

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FLÁVIO RABELLO DE SOUZA

**METRO ETHERNET E LIGHT-TRAILS: UMA PROPOSTA
EXPERIMENTAL DE INTEGRAÇÃO VIA
FUNCIONALIDADES OAM**

VITÓRIA
2008

FLÁVIO RABELLO DE SOUZA

**METRO ETHERNET E LIGHT-TRAILS: UMA PROPOSTA
EXPERIMENTAL DE INTEGRAÇÃO VIA
FUNCIONALIDADES OAM**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Elétrica do
Centro Tecnológico da Universidade Federal
do Espírito Santo, como requisito parcial
para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Moises Renato Nunes
Ribeiro.

VITÓRIA
Dezembro 2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S729m Souza, Flávio Rabello de, 1973-
Metro Ethernet e Light-trails : uma proposta experimental de
integração via funcionalidades OAM / Flávio Rabello de Souza. –
2008.
130 f. : il.

Orientador: Moisés Renato Nunes Ribeiro.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Redes de computadores - Protocolos. 2. Ethernet (Redes
locais de computadores). 3. Redes de computadores - Gerência.
4. Arquitetura de redes de computadores. 5. Comunicações
ópticas. I. Ribeiro, Moisés Renato Nunes. II. Universidade Federal
do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

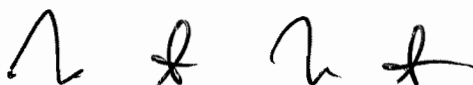
FLÁVIO RABELLO DE SOUZA

**METRO ETHERNET E LIGHT-TRAILS: UMA PROPOSTA
EXPERIMENTAL DE INTEGRAÇÃO VIA
FUNCIONALIDADES OAM**

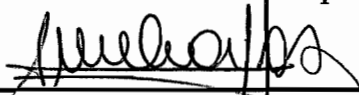
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 17 de dezembro de 2008

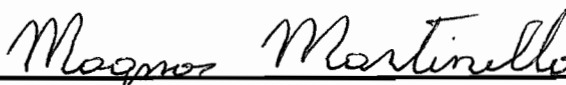
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Moises Renato Nunes Ribeiro – Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo – DEL/CT/UFES



Prof. Dr. Amílcar Careli César
Universidade de São Paulo – SEL/EESC/USP



Prof. Dr. Magnos Martinello
Universidade Federal do Espírito Santo – DI/CT/UFES

“Bastará nunca sermos injustos para estarmos sempre inocentes?”

(Jean-Paul Sartre)

Dedico este trabalho aos meus grandes amores: minha esposa Sueli, pela paciência e por me apoiar durante todos estes anos e ao meu filho Caio, por me entender em todas as vezes em que o “papai não podia brincar com você porque precisava estudar”.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos:

ao meu orientador, e amigo, prof. Dr. Moises Renato Nunes Ribeiro, pelo apoio e paciência durante todos estes anos e por acreditar na possibilidade de conclusão deste trabalho;

aos professores Marcelo Segatto, Evandro Ottoni e Anilton Garcia pelos conhecimentos compartilhados;

à ANATEL, e em especial ao gerente da Unidade Operacional do ES, Sr. Antonio Rogério Silva, por me possibilitarem dar andamento no mestrado;

ao prof. Paulo Amaral pelo apoio no desenvolvimento do acoplamento mecânico do filtro;

aos alunos de IC Adriano Nardotto e Pedro Piccoli, pela ajuda nos trabalhos experimentais;

a todos do Labtel, do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES, pela amizade, pelos anos de convivência e pela disponibilidade em me ajudarem sempre que precisei;

aos demais professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES, que contribuíram com seus valiosos conhecimentos;

e por fim a todos que de alguma forma me ajudaram nesta jornada difícil, mas prazerosa, que foi o mestrado.

Resumo

O explosivo crescimento de demanda de tráfego observada nas últimas décadas, tanto em largura de banda quanto em velocidade de aprovisionamento, vem sendo a base para a criação de novas estratégias dinâmicas que irão mudar radicalmente os aspectos das redes metropolitanas. Tal evolução deve transformar os conceitos de rede de acesso e de rede metropolitana. A fim de endereçar esta demanda, as redes metropolitanas existentes precisarão evoluir não apenas na direção da opticalização da infra-estrutura, mas também na ampliação da capacidade de rápida reconfiguração da rede para atender demandas dinâmicas. Com base nesta perspectiva, esta dissertação de mestrado analisa o contexto atual das tecnologias de redes ópticas e redes ethernet metropolitanas, contemplando normas e padrões envolvidos. Avaliamos também a abordagem da arquitetura Light-trail (LT) como proposta para o cenário das redes metropolitanas. Em seguida apresentamos o conjunto normativo vigente relacionado à infra-estrutura de *Operation, Administration & Maintenance* (OAM) para redes ethernet. Por fim, apresentamos nossa proposta de integração entre redes metro ethernet e LT. Nesta proposta implementamos experimentalmente um arranjo capaz de representar uma rede metro-LT mínima, desenvolvemos um dispositivo microcontrolado desempenhando o papel de *shutter* opto-mecânico e apresentamos nossa implementação de um subsistema mínimo de OAM, capaz de avaliar qualitativamente os segmentos ópticos que compõem os LTs. Estudos de casos de tempos de comutação de LT e da influência de fenômenos de camada física, tais como ruído ASE e interferência homódina, também foram realizados.

Abstract

The explosive growth of traffic demand observed in the last few decades, regarding both bandwidth requests and provisioning speed, is the driving force behind the creation of new dynamic strategies that will radically change the metropolitan networks scenario. Such revolution may transform paradigms of both access and metropolitan networks. In order to meet this new environment, existing metropolitan networks will need to evolve, not only by infrastructure “opticalization”, but also by enlarging its reconfiguration capability to support dynamic demands. Based on this perspective, this dissertation analyses today’s optical networks and metropolitan ethernet technologies contexts, as well as its standardization. We also evaluate the Light-trail (LT) architecture as a candidate for the metropolitan networks scenario. We also present the normative set related to Operation, Administration & Maintenance (OAM). Finally, we introduce our metro-LT integration proposal, using OAM functionalities. In this proposal, we have developed a configuration setup capable of representing a minimal metro-LT network, which is composed of a microcontrolled optomechanical shutter and a minimal OAM subsystem. Case studies of LT switching time and physical layer impairments such as ASE noise and homodyne interference have also been realized.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Nomenclaturas

Capítulo 1: Introdução 21

1.1 Contribuições e Estrutura do Trabalho: 23

Capítulo 2: Contextualização..... 24

2.1 Redes Ópticas: 24

2.1.1 Meios Ópticos: 25

2.1.2 Elementos de Redes Ópticas: 26

2.1.2.1 Transmissores ópticos: 27

2.1.2.2 Wavelength Division Multiplexing (WDM): 27

2.1.2.3 Regeneradores e Amplificadores ópticos: 28

2.1.2.4 Receptores ópticos: 30

2.1.2.5 Acopladores Ópticos: 31

2.1.2.6 Filtros Ópticos: 32

2.1.2.7 Elementos de Comutação na Rede Óptica: 34

2.1.2.7.1 Optical Add/Drop Multiplexer (OADM): 36

2.1.3 A Evolução das Redes de Transporte: 37

2.2 Redes Ethernet 38

2.2.1 Carrier Ethernet: 39

2.2.2 Atributos do Carrier Ethernet: 41

2.2.2.1 Tipos Padronizados: 41

2.2.2.2 Serviços Padronizados: 42

2.2.2.3 Escalabilidade: 45

2.2.2.4 Gerenciamento de Serviços: 45

2.2.2.5 Confiabilidade: 46

2.2.2.6 Qualidade De Serviço QoS: 46

2.2.3 Padrões Envolvidos: 47

2.2.3.1 IEEE 802.3ah: Ethernet in the First Mile – EFM 49

2.2.3.2 IEEE 802.1ad: Provider Bridges – PB 49

2.2.3.3	<i>IEEE 802.1ah: Provider Backbone Bridge – PBB</i>	52
2.2.3.4	<i>IEEE 802.1Qay: Provider Backbone Bridge Traffic Engineering – PBB-TE</i>	53
2.2.3.5	<i>ITU-T G.8031: Ethernet Protection Switching</i>	53
2.2.3.6	<i>IETF:</i>	55
2.2.3.7	<i>MEF6.1: Ethernet Services Definition - Phase 2</i>	55
2.2.3.8	<i>MEF2: Requirements and Framework for Ethernet Service Protection in Metro Ethernet Networks</i>	56
2.2.4	Perspectivas futuras para a arquitetura:.....	57
2.3	Sumário:	57
Capítulo 3: Light-trails – LT		59
3.1	Introdução:	59
3.2	A arquitetura e hardware LT:	61
3.2.1	Forma de operação:	64
3.2.2	Controle de acesso ao meio:	65
3.2.2.1	<i>LT-MAC:</i>	65
3.2.2.2	<i>LT-BUS MAC:</i>	66
3.2.2.3	<i>LT FAIR ACCESS MAC:</i>	66
3.3	LT em redes metropolitanas:	67
3.4	Sumário:	68
Capítulo 4: Operation, Administration and Maintenance – OAM		69
4.1	Introdução:	69
4.2	Visão geral do Ethernet OAM (Eth-OAM):	69
4.3	Elementos da arquitetura:	71
4.3.1	Maintenance Entity (ME):.....	72
4.3.2	Maintenance Entity Group (MEG) ¹⁷ / Maintenance Association (MA) ¹⁸ :.....	72
4.3.3	MEG End Point ¹⁷ / MA End Point ¹⁸ (MEP):.....	73
4.3.4	MEG Intermediate Point ¹⁷ / MA Intermediate Point ¹⁸ (MIP):	73
4.3.5	MEG Level ¹⁷ / MA (MD) Level ¹⁸ :.....	73
4.4	Padrões Eth-OAM:	73
4.4.1	IEEE 802.1ag: Connectivity Fault Management	74
4.4.1.1	<i>Formato das mensagens CFM:</i>	74

4.4.1.2	<i>Continuity Check Protocol – CC:</i>	76
4.4.1.2.1	PDU CCM:	77
4.4.1.3	<i>Loopback Protocol – LB:</i>	79
4.4.1.3.1	PDU LBM:	80
4.4.1.4	<i>Linktrace Protocol – LT:</i>	81
4.4.1.4.1	PDU LTM:	82
4.4.2	ITU-T Y.1731: OAM Functions and Mechanisms for Ethernet Based Networks	83
4.4.3	MEF17:	87
4.5	Sumário:	87

Capítulo 5: Implementação da Funcionalidade OAM 88

5.1	Introdução:	88
5.2	Plataformas de Hardware:	90
5.2.1	Estações de rede:	90
5.2.2	Adaptadores de Rede Ethernet:	91
5.2.3	Transmissores/Receptores Ópticos:	91
5.2.4	Microcontrolador PIC:	92
5.2.5	Filtros:	93
5.3	Plataformas de Software:	94
5.3.1	Plataforma de desenvolvimento e testes:	94
5.3.2	Plano de controle LT:	95
5.3.3	OAM:	95
5.3.4	Software Embarcado no Microcontrolador PIC:	101
5.4	Sumário:	102

Capítulo 6: Avaliação de Desempenho da Proposta de Integração Via Funcionalidades OAM..... 104

6.1	Introdução:	104
6.2	Metodologia:	105
6.3	Tempo de Comutação do LT:	105
6.3.1	Caracterização do <i>shutter</i> :	105
6.3.1.1	<i>Etapa 1: Contraste entre os níveis de atenuação ON/OFF</i>	106
6.3.1.2	<i>Etapa 2: OAM monitorando o shutter</i>	107
6.4	Diagnóstico de mensagens OAM:	109

6.5	Monitoramento de Performance da Camada Física:	110
6.5.1	Comportamento na Presença de Ruído ASE:	111
6.5.2	Interferência Homódina:.....	117
6.5.2.1	<i>Extremo 01: Melhor caso</i>	119
6.5.2.2	<i>Extremo 02: Pior Caso</i>	120
6.6	Sumário:	123
Capítulo 7:	Conclusões	124
7.1	Perspectivas:.....	125
Referências Bibliográficas		

Lista de Figuras

Figura 1. Elementos de um Sistema de Transmissão Óptica	26
Figura 2. Formas de utilização dos amplificadores ópticos. (a) <i>Booster</i> (b) Pré-amp (c) <i>In-line</i>	30
Figura 3. Tipos de acopladores. (a) 2x2 Fibra Fundida e (b) 2x2 Guia de Onda. [23]	32
Figura 4. (a) Rede NxN de acopladores 2x2. (b) <i>Star Coupler</i> . [23][20].....	32
Figura 5. Optical Cross Connect	35
Figura 6. OADM	37
Figura 7. Modelo de camadas definido pelo MEF. [7].....	41
Figura 8. Atributos da arquitetura Metro Ethernet. [8].....	41
Figura 9. Tipos de serviços padronizados pelo MEF. [8].....	42
Figura 10. Formação dos serviços ethernet. [8].....	43
Figura 11. Serviços baseados no tipo E-LINE . [8]	43
Figura 12. Serviços baseados no tipo E-LAN . [8].....	44
Figura 13. Serviços baseados no tipo E-TREE . [8]	44
Figura 14. Padrões Relacionados à Carrier Class Ethernet. [3]	48
Figura 15. Quadro 802.1ad.....	50
Figura 16. Exemplos de utilização do Provider Bridges. [30].....	51
Figura 17. Quadro IEEE 802.1ah	52
Figura 18. Exemplo ITU-T G.8031. (a) Circuito bidirecional em estado normal. (b) Circuito bidirecional em estado de falha. [36]	55
Figura 19. Mecanismos de proteção MEF2. (a) ALNP e (b) EEPP . [6]	57
Figura 20. Nó LT	63
Figura 21. LT unidirecional.....	64
Figura 22. Modelo OAM [9]	71
Figura 23. Transporte de PDU CFM em quadro ethernet	74
Figura 24. Formato Geral Quadro IEEE CFM	76
Figura 25. Campo Flags do quadro CCM	77
Figura 26. Formato do quadro CCM/IEEE	79

Figura 27. PDU LBM.....	81
Figura 28. Flags PDU LTM	82
Figura 29. PDU LTM.....	83
Figura 30. PDU CCM/ITU-T	84
Figura 31. Rede LT básica de 4 nós.....	88
Figura 32. Setup do ambiente de implementação	90
Figura 33. Vista superior (a) e inferior (b) da placa microcontroladora.....	92
Figura 34. (a) Acoplamento Filtro x MP (b) PIC x MP x Filtro	93
Figura 35. Filtro Óptico	94
Figura 36. PDU CCM	96
Figura 37. Quadro CCM capturado pelo <i>wireshark</i>	98
Figura 38. Quadro CCM capturado no modo <i>debug</i>	99
Figura 39. CCM-RX BER: exibição de dados na console.....	100
Figura 40. CCM-RX BER: arquivo de saída	100
Figura 41. Configuração para caracterização do <i>shutter</i>	105
Figura 42. Histogramas (a)Tempo de comutação do <i>shutter</i> (b)Quadros perdidos durante o evento	108
Figura 43. Arranjo para avaliação de interferência por ruído ASE (a) diagrama lógico (b) configuração física.....	111
Figura 44. CCM perdidos por segundo x OSNR.....	113
Figura 45. CCMLR x Tempo (a) -10,82dB (b) -11,47dB (c) -11,92dB	114
Figura 46. Estimativa de BER em função da CCMLR (ASE)	116
Figura 47. Arranjo para avaliação da interferência homódina.	118
Figura 48. CCMLR x OSIR para polarização perpendicular e paralela.....	120
Figura 49. Comportamento temporal da interferência homódina.	121
Figura 50. Estimativa de BER em função da CCMLR (Homódina).....	122

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características dos tipos de filtros [24]	34
Tabela 2. Serviços padronizados pelo MEF	45
Tabela 3. Padronização Carrier Ethernet. Fonte: MEF.....	48
Tabela 4. OpCodes CFM.....	75
Tabela 5. Valores assumidos pelo período.....	77
Tabela 6. Campo <i>Maintenance Domain Name Format</i>	78
Tabela 7. Campo Short MA <i>Name Format</i>	79
Tabela 8. OpCodes OAM adicionais do ITU-T	83
Tabela 9. Dados coletados pelo CCM-RX-BER.....	99
Tabela 10. Acionamento do MP. (a) Sentido horário (b) Sentido anti- horário	102
Tabela 11. Amostra de eventos de comutação do <i>shutter</i>	108

Nomenclaturas

Unidades:

dBm	decibéis em relação à 1mW
Gbps	Gigabits por segundo
Mbps	Megabits por segundo
ms	milissegundos
nm	nanometro
qps	quadros por segundo
μm	micrometro

Siglas:

AOTF	<i>Acousto-Optic Tunable Filter</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CBS	<i>Committed Burst Size</i>
CCM	<i>Continuity Check Message</i>
CFM	<i>Connectivity Fault Management</i>
CIR	<i>Committed Information Rate</i>
CIR	<i>Committed Information Rate</i>
CN	<i>Converner Node</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
DA	<i>Destination Address</i>
DFA	<i>Doped Fiber Amplifiers</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EBS	<i>Excess Burst Size</i>
EFM	<i>Ethernet in the First Mile</i>
EFMA	<i>Ethernet in the First Mile Alliance</i>
EIR	<i>Excess Information Rate</i>
EN	<i>End Node</i>
EOTF	<i>Eletro-Optic Tunable Filter</i>
EVC	<i>Ethernet Virtual Circuit</i>

FBG	<i>Fibre Bragg Grating</i>
FP	<i>Fabry-Perot</i>
GBIC	<i>Gigabit Interface Converter</i>
GMPLS	<i>Global Multi Protocol Label Switching</i>
HDSL	<i>High-speed Digital Subscriber Line</i>
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	<i>Internet protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LBM	<i>Loopback Message</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LP	<i>Light Path</i>
LT	<i>Light-trail</i>
LTM	<i>Linktrace Message</i>
MA	<i>Maintenance Association</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
ME	<i>Maintenance Entity</i>
MEF	<i>Metroethernet forum</i>
MEG	<i>Maintenance Entity Group</i>
MEP	<i>Maintenance Entity Group End Point</i>
MIP	<i>Maintenance Entity Group Intermediate Point</i>
MP2MP	<i>Multipoint to Multipoint</i>
MPLS	<i>Multi Protocol Label Switching</i>
MPLS	<i>Multi-Protocol Label Switching</i>
MSTP	<i>Multiple Spanning Tree Protocol</i>
MZI	<i>Mach-Zender Interferometer</i>
NNI	<i>Network-Network Interface</i>
OADM	<i>Optical Add/Drop Multiplexer</i>
OAM	<i>Operation, Administration and Maintenance</i>
OC	<i>Optical Carrier</i>

O-E-O	Opto-eletroóptica
OSC	<i>Optical Supervisory Channel</i>
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
OXC	<i>Optical Cross Connect</i>
PB	<i>Provider Bridges</i>
PBB	<i>Provider Backbone Bridge</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PIC	<i>Peripheral Integrated Controller (Microchip®)</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RA	<i>Raman Amplifier</i>
RFC	<i>Request for Comments</i>
RMP	<i>Rooted Multipoint</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer</i>
RSTP	<i>Rapid Spanning Tree Protocol</i>
SA	<i>Source Address</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
SONET	<i>Synchronous Optical networking</i>
STM	<i>Synchronous Transport Modules</i>
STP	<i>Spanning Tree Protocol</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TTL	<i>Time to Live</i>
UNI	<i>User-Network Interface</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

Capítulo 1: Introdução

O explosivo crescimento de demanda de tráfego observada nas últimas décadas, tanto em largura de banda quanto em velocidade de provisionamento, vem sendo a base para a criação de novas estratégias dinâmicas que irão mudar radicalmente os aspectos das redes metropolitanas. Estas são agora orientadas a serviços, como backup de banco de dados institucionais em área geográfica diversa (*Storage Area Network*) [10][14], serviços de transmissões *multicasting*, vídeo de alta definição, monitoramento remoto de tráfego, televigilância dos grandes centros e do meio ambiente, oferta de serviços de banda larga residencial, entre outros. Tal evolução deve transformar os conceitos de rede de acesso e de rede metropolitana. Para que isso possa se tornar realidade, as redes metropolitanas existentes precisarão evoluir não apenas na direção da opticalização da infra-estrutura, mas também na ampliação da capacidade de rápida reconfiguração da rede para atender demandas dinâmicas.

A perspectiva de novas aplicações, como as citadas anteriormente, decorrentes do aumento da capacidade instalada da casa dos Mbps para as dezenas de Gbps, implementadas por tecnologias como CDWM e DWDM, ou simplesmente xWDM (*Wavelength Division Multiplexing*), desenvolvida originalmente para redes ponto a ponto, fez real a possibilidade de se construir redes metropolitanas (MAN – *Metropolitan Area Network*) multigigabit a custos viáveis. Estas novas MANs agora não mais utilizam um único comprimento de onda no meio, mas todo um espectro disponível, demandando a aplicação de tecnologias como comutação de comprimento de onda, até então viáveis economicamente apenas para as redes de transporte de telecomunicações.

Apesar da evolução das tecnologias de controle e comutação, decorrente da intensa pesquisa na área nas últimas décadas, os custos dos elementos comutadores ópticos (*Optical Cross Connect* – OXC) [20], utilizados em topologias de rede em

malha, ainda são bastante altos, dificultando a popularização desta tecnologia nas redes metropolitanas.

Todavia, mesmo com o advento de tecnologias xWDM, este aumento na demanda por largura de banda não foi acompanhado pelo equivalente aumento de receita das operadoras, o que nos leva à necessidade de desenvolvimento de soluções de custo ainda mais baixo.

O conceito de Light-trails (LT) [15][17] é uma proposta para simplificar o problema de comutação no domínio óptico. O objetivo é estabelecer uma conexão unidirecional entre origem e destino (um *light-trail*), em um único comprimento de onda, que permite a todos os nós intermediários transmitir dados aos nós vizinhos, no sentido do fluxo origem-destino, sem necessidade de conversões O-E-O. O estabelecimento destas conexões unidirecionais depende da segmentação controlada da rede, papel desempenhado por dispositivos de baixo custo conhecidos como filtros ópticos, que fazem a função de chaves ON-OFF.

No que diz respeito às arquiteturas de comunicação em rede, seguramente o padrão ethernet é o padrão mais bem sucedido da história e o mais amplamente difundido e aplicado [19]. Isto se deve a vários motivos, dentre eles ampla padronização, enorme gama de fabricantes, facilidade de migração, interoperabilidade entre os padrões que se sucedem e constante desenvolvimento, o que acaba redundando em baixo custo de implementação e manutenção [26]. Além disso, recentes padronizações impulsionaram a arquitetura ethernet, originalmente concebida para LAN, na direção das redes MAN/WAN.

A *Carrier Grade* ou *Carrier Class Ethernet* (Ethernet Classe Operadora) impulsionam hoje o desenvolvimento do padrão e desencadearam a implementação de diversas funcionalidades necessárias às soluções que almejam prestar serviços *Carrier Class*, tais como [5]:

- Funções OAM - *Operation, Administration and Maintenance*,
- Isolamento entre os planos de Transporte/Gerência (da operadora) e o do usuário,
- Proteção, e
- QoS.

Estas características nos levam a considerar sobre a viabilidade de sua utilização na implementação de uma solução Light-trail baseada em uma arquitetura ethernet, unindo as vantagens que cada uma das arquiteturas oferece.

A proposta do presente trabalho é a implementação de um *framework* mínimo, que contenha funcionalidades OAM capazes de identificar falhas nos canais ópticos, ou *light-trails*, bem como controlar as chaves ópticas (*shutters*) que atuem da delimitação dos segmentos ópticos que os definem.

1.1 Contribuições e Estrutura do Trabalho:

A principal contribuição do presente trabalho reside na demonstração da viabilidade da integração entre a arquitetura LT e redes metroethernet. Como demonstração de princípio, implementamos um elemento de comutação optomecânico microcontrolado, capaz de ser operado através de mensagens de rede, além de um subsistema mínimo OAM capaz de gerar, enviar, receber e analisar mensagens de teste de continuidade.

A aplicação da ferramenta Eth-OAM é demonstrada pela análise experimental do comportamento de uma rede física reconfigurável LT, através da avaliação de parâmetros diversos como o tempo de comutação do LT e degradações da camada física como a presença de sinais interferentes do tipo ruído ASE ou homódinos.

O trabalho está estruturado da seguinte forma. No Capítulo 2 contextualizamos as atuais tecnologias e padrões voltados às implementações *carrier/metro ethernet*. Descrevemos no Capítulo 3 a arquitetura Light-trail, suas características, aspectos construtivos, planos de controle e formas de operação. Já no Capítulo 4 são discutidos as especificações e padrões OAM voltadas à arquitetura ethernet. A apresentação da configuração implementada e a proposta de integração metro-LT via OAM são realizadas nos Capítulo 5 e Capítulo 6. Por fim, avaliamos no Capítulo 7 os resultados obtidos, apresentamos nossas conclusões, contribuições e perspectivas futuras.

Capítulo 2: Contextualização

Neste capítulo são abordadas as arquiteturas envolvidas na implementação de soluções de rede WAN sob meio óptico. Apresentaremos na Seção 2.1 os conceitos relacionados às tecnologias em redes ópticas, seus padrões e arquiteturas comumente utilizadas. Na Seção 2.2 detalharemos a arquitetura ethernet e suas extensões MAN/WAN.

2.1 Redes Ópticas:

A crescente demanda por largura de banda, fortemente impulsionada pela explosão da internet na última década, forçou a aceleração no processo de substituição dos antigos meios metálicos por outros mais eficientes e de maior capacidade.

Até a presente data, as tecnologias de transmissão por fibras ópticas são as principais alternativas para se estender a capacidade de transmissão das redes de dados, já tendo sido atingidas, experimentalmente, velocidades da ordem de Tbps [2].

Dentre as vantagens das transmissões ópticas podemos ressaltar: baixa atenuação, baixa distorção, baixa potência requerida do sinal transmitido, isolamento elétrica, banda passante virtualmente infinita, imunidade a interferências radioelétricas.

No mundo das redes LANs, MANs e WANs, tecnologias como WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), desenvolvidas originalmente para redes ponto a ponto, possibilitaram a implementação de redes multigigabit a custos viáveis [1]. Estas novas MANs agora não mais utilizam apenas um único comprimento de onda no meio, mas todo um espectro disponível. Isto demanda a aplicação de tecnologias como comutação de comprimento de onda, até então viáveis economicamente apenas para as redes de transporte de telecomunicações como SDH/SONET [23][25][40].

Os sistemas de comunicação óptica, em linhas gerais são compostos dos seguintes elementos:

- Meios de transmissão (Seção 2.1.1);
- Transmissores (Seção 2.1.2.1);
- Amplificadores e Regeneradores (Seção 2.1.2.2);
- Receptores (Seção 2.1.2.4);
- Acopladores Ópticos (Seção 2.1.2.5);
- Filtros (Seção 2.1.2.6);
- *Optical Cross Connectors* (Seção 2.1.2.7);
- Multiplexadores/Demultiplexadores (Seção 2.1.2.7.1);
- *Wavelength Division Multiplexing* (Seção 2.1.2.2)

Discutiremos cada um destes elementos nas seções seguintes.

2.1.1 Meios Ópticos:

Nas últimas décadas do século passado, tempos depois da invenção do LASER, as fibras ópticas emergiram como uma alternativa para a transmissão de dados. Soluções comerciais surgiram forçando a continuidade das pesquisas na área, o que fez com que a capacidade de transmissão dos sistemas evoluísse em um fator de 100.000 vezes em um período de 25 anos [20].

Fibras ópticas são filamentos de material dielétrico¹, com capacidade de guiar a luz, e com formato normalmente cilíndrico. Em sua região central reside seu “núcleo”, que está encapsulado pela “casca”, camada externa da fibra.

O sinal luminoso propaga-se nas fibras ópticas por reflexão total, tendo com base a diferença entre os índices de refração do núcleo (maior) e o da casca (menor).

Na atualidade, contamos com dois tipos básicos de fibras ópticas aplicáveis em sistemas de telecomunicações: multimodo e monomodo. Em sistemas *carrier class*, o segundo tipo é utilizado quase que na totalidade dos casos, tendo em vista a necessidade de transmissão a longas distâncias, que demandam baixas perdas no meio [20][23][22].

¹ Normalmente vidros ou plásticos

Além do tipo de fibra, outro critério utilizado na caracterização dos sistemas ópticos é quanto à distância alcançada. Sistemas ditos “*long-haul*” são aqueles com capacidade de transmitir a distâncias de algumas dezenas ou centenas de quilômetros, ou seja, atingem áreas inter-metropolitanas, interestaduais ou internacionais. Já os sistemas denominados “*short-haul*” são aqueles cuja área de atuação confina-se no perímetro metropolitano ou mesmo no “*local loop*” da operadora.

Das três “janelas” do espectro viáveis para transmissões ópticas (800, 1300 e 1550nm) [20][21], as soluções comerciais para sistemas “*long-haul*” atuais vêm operando nas faixas de 1300nm e 1500nm, sendo esta última a mais utilizada, visto possuir a menor atenuação intrínseca ($\sim 0.2\text{dB/km}$). Também nesta última janela concentram-se a maioria das soluções WDM comerciais atuais.

Detalhes dos aspectos físicos dos tipos de fibras mencionadas, seus modos de propagação, características de atenuação e distorção, podem ser encontrados em [20],[21], [22] e [23].

2.1.2 Elementos de Redes Ópticas:

Naturalmente, a existência do meio de transmissão por si só não permite a transmissão de dados com as velocidades demandadas na atualidade. Diversos elementos precisam ser associados a fim de que se dê a comunicação entre os nós ativos da rede. A Figura 1 mostra os elementos que compõem um sistema de transmissão óptica.

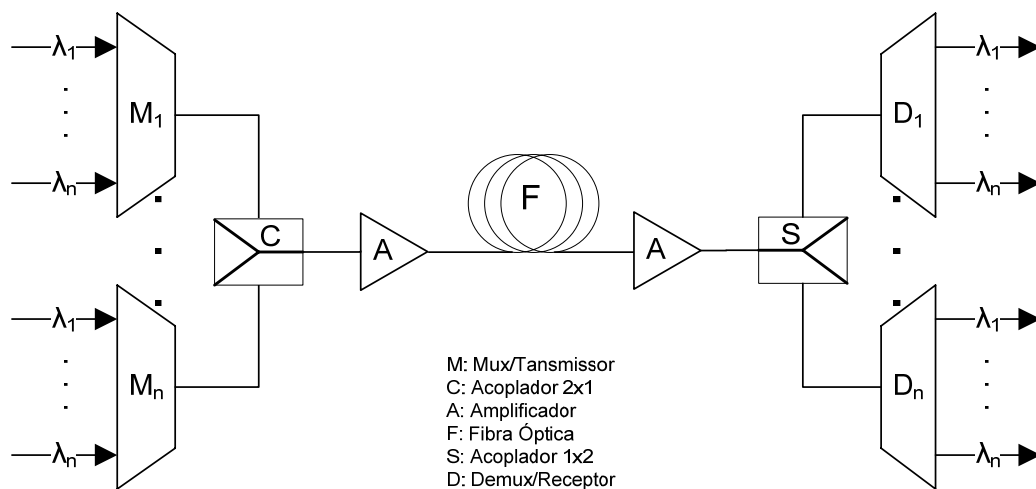


Figura 1. Elementos de um Sistema de Transmissão Óptica

Nas seções seguintes apresentamos as características de alguns dos vários dispositivos utilizados na construção de redes ópticas.

2.1.2.1 Transmissores ópticos:

Um transmissor óptico tem a missão de realizar a conversão da informação a ser enviada entre os domínios elétrico e óptico, e em seguida inseri-la no meio de transmissão. Os transmissores para sistemas de fibras ópticas são normalmente dispositivos a base de semicondutor, devido às suas vantagens características [20] como: tamanho reduzido, alta confiabilidade e eficiência, dimensão da área de emissão compatível com a seção do núcleo das fibras atuais, larga faixa útil de comprimentos de onda para transmissão e possibilidade de modulação direta em altas frequências.

São utilizados, em sistemas de telecomunicações, basicamente dois tipos de transmissores ópticos à semicondutor [20][22]: os baseados em LEDs (*Light Emitting Diode*) e os LASERs (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Os primeiros são utilizados normalmente em fibras multimodo, com velocidades de até 10Mbps, visto sua baixa potência e ausência de coerência no sinal. Já os LASERs são aplicados em fibras monomodo, sendo capazes de emitir sinais de alta potência, de gerar sinais coerentes e de responder à altas taxas de modulação. Mais detalhes sobre fontes de sinais ópticos poderão ser encontrados em [20]-[24].

2.1.2.2 Wavelength Division Multiplexing (WDM):

O WDM é uma abordagem que possibilita explorar a enorme largura de banda disponível nas fibras ópticas, dividindo-a em múltiplos canais ópticos distintos, capazes de realizar transmissões na maior taxa permitida pelos dispositivos eletrônicos. Esta tecnologia permitiu que fossem atingidas taxas de transmissão da ordem de Tbps.

A tecnologia WDM é a única atualmente capaz de possibilitar a transmissão simultânea, em uma mesma fibra, de sinais das mais diversas naturezas como TDM, IP, *storage area networks* (SAN), vídeo, etc, independentemente de suas taxas ou protocolos [1].

Embora existam outras faixas disponíveis no espectro das fibras ópticas, os sistemas WDM atuais vêm se utilizando de 3 bandas existentes na faixa de 1550nm: C (1530-1565nm), L (1565-1625) e S (1460-1530).

Duas modalidades de WDM coexistem hoje:

- Dense WDM (DWDM): permite a transmissão de centenas de comprimentos de onda [38] em uma mesma fibra, com espaçamento das portadoras ópticas entre 12,5 GHz e 100 GHz. Todavia o custo dos equipamentos capazes de transmitir e detectar este elevado número de comprimentos de onda ainda é proibitivo comercialmente.
- Coarse WDM (CWDM): Reduz as exigências sobre os equipamentos ópticos ao transmitir um número menor de comprimentos de onda, até 18 [39] com um espaçamento de 20 nm. Tornou viável a utilização comercial da tecnologia ao permitir o uso de transmissores e filtros mais baratos, visto os comprimentos de ondas estarem mais distantes entre si. Esta modalidade de WDM vem ganhando espaço nas redes metropolitanas.

Uma das principais vantagens do WDM é que o transporte de dados entre a origem e o destino numa rede óptica pode se dar inteiramente no domínio óptico ao utilizarmos elementos ópticos de comutação. Isto evita a necessidade de conversão para o domínio elétrico, para só então realizar as operações de *Add/Drop* requeridas ou de interconexão entre fibras distintas.

2.1.2.3 Regeneradores e Amplificadores ópticos:

Embora já se fabriquem hoje transmissores ópticos com potências relativamente elevadas, o seu alto custo, aliado às perdas nas fibras e conexões, decorrentes das distâncias de transmissão cada vez maiores entre sistemas de comunicação óptica, faz necessária a utilização de equipamentos que recuperem o sinal óptico ao longo do caminho. Esta recuperação pode se dar de duas formas: por regeneração elétrica ou método fotônico.

No processo de regeneração, o sinal óptico é convertido inicialmente para o domínio elétrico e amplificado. A sequência de bits original e o *clock* do sinal são então recuperados e reformatados, para em seguida serem reconvertidos para o domínio óptico e reenviados (3R \rightarrow *Regenerate, Retime and Retransmit*). Uma vez que a retransmissão parte da informação em seu estado original, todo ruído e distorções inseridos ao longo do caminho óptico anterior são eliminados durante este processo. Todavia, a utilização deste tipo de dispositivo tem se tornado cada vez mais

difícil. Isto se deve ao fato de que o aumento nas taxas de transmissão dos sistemas, que vêm evoluindo ao longo dos anos, desencadeou uma também “evolução” proporcional nos custos dos dispositivos eletro-ópticos necessários ao processo, capazes de operar a estas velocidades.

Nos atuais sistemas de transmissão WDM [22][25], portanto, utilizar-se do recurso de regeneração torna-se um procedimento complexo e custoso visto sua natureza multinacalizada. . Uma forma eficiente de realizar a recuperação deste sinal é através da utilização de amplificadores ópticos [20]-[22], que permitem aumentar a intensidade do sinal, compensando, logo, as perdas do meio, sem necessidade de conversões O-E-O (opto-elétro-óptica).

Dentre as tecnologias utilizadas para amplificação no domínio óptico, podemos citar [20]-[22]:

- Amplificadores a Fibra Dopada (*Doped Fiber Amplifiers* – DFA)
- Amplificadores Ópticos a Semicondutor (*Semiconductor Optical Amplifier* – SOA)
- Amplificadores Raman (*Raman Amplifier* – RA)

Todavia, como na amplificação eletrônica, tais amplificadores também apresentam características de saturação de ganho e inserção de ruído (óptico), denominado ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). Logo o desempenho total do sistema dependerá do seu ponto de inserção no enlace óptico [20]. Na modalidade “*booster*” o elemento é inserido após o transmissor e antes do meio óptico. Esta configuração pode aumentar a distância de transmissão pelo aumento de potência, enquanto o ruído ASE gerado por ele é atenuado pelo meio de transmissão. Entretanto, tais amplificadores podem sofrer de saturação de ganho em decorrência de uma alta potência de entrada (Figura 2a). Já o posicionamento do amplificador imediatamente antes do receptor, configuração conhecida com “pré-amplificador” (Figura 2b), nos permite melhorar a sensibilidade do receptor, visto que este opera com alto nível de ganho, desde que filtros ópticos limitem a quantidade de ruído que chega ao fotodetector. Os amplificadores também podem ser inseridos de forma seriada ao longo do caminho óptico. Esta modalidade, conhecida como “*in-line*” (Figura 2c), nos permite atingir longas distâncias uma vez que o sinal óptico pode ser reamplificado repetidas vezes, ressalvadas as restrições relativas às distorções e

acúmulo de ruídos ASE, além dos problemas logísticos de acomodação física, alimentação elétrica e refrigeração, inexistentes nas configurações anteriores.

Embora os amplificadores ópticos resolvam o problema da recuperação do sinal sem conversão O-E-O, estes são elementos “analógicos” e sua utilização sucessiva introduz ruído e distorção no sinal. Isto faz com que, em alguns pontos do caminho óptico a regeneração precise ser aplicada.

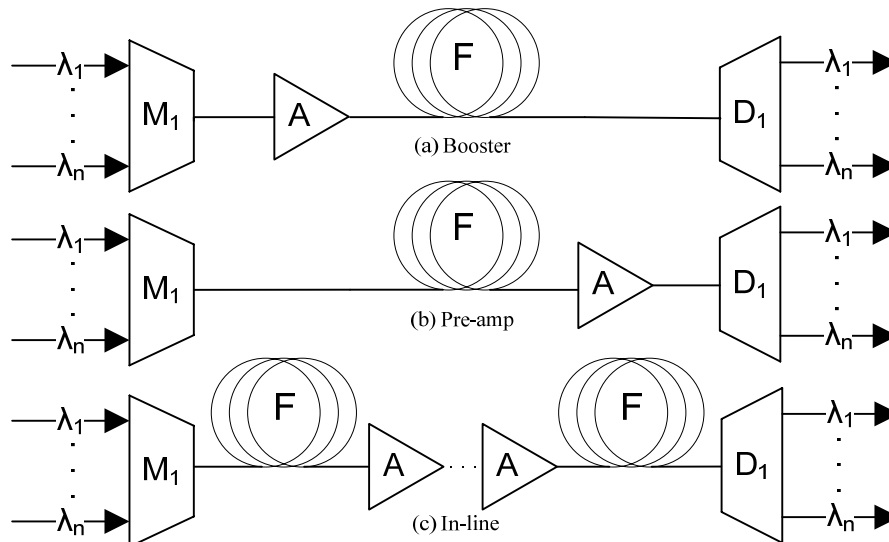


Figura 2. Formas de utilização dos amplificadores ópticos. (a) *Booster* (b) *Pré-amp*
(c) *In-line*

2.1.2.4 Receptores ópticos:

Receptores ópticos têm por função realizar a conversão do sinal no domínio óptico para o domínio elétrico, recuperando a informação enviada. Seu elemento mais importante é o fotodetector, que converte o sinal luminoso em corrente elétrica através do efeito fotoelétrico.

Fotodetectores aplicáveis em sistemas de comunicações ópticas devem possuir alta sensibilidade, rápida resposta, baixo ruído, baixo custo, alta confiabilidade e tamanho compatível com o núcleo da fibra utilizada [20]. Os tipos de fotodetectores que congregam quase todas estas características são os baseados em semicondutor, sendo que os mais utilizados atualmente são os fotodiodos tipo PIN e tipo APD (*Avalanche Photodiode*) [20]-[22]. O primeiro tipo é composto de uma junção semicondutora P-N, com uma camada de material intrínseco² entre elas. Esta camada

² Não dopado ou fracamente dopado

adicional permite ampliar o campo elétrico na região de depleção, melhorando sua resposta em frequência, muito embora prejudique seu tempo de resposta e sua largura de banda em decorrência do longo tempo de trânsito. Já os fotodiodos APD são basicamente diodos PIN com uma alta polarização reversa (da ordem de 50V) e têm a capacidade de amplificar³ o sinal luminoso durante seu processo de detecção. Em relação ao PIN, o APD possui maior sensibilidade, embora o processo de avalanche produza naturalmente mais ruído, o que limita sua aplicação em algumas situações.

Maiores detalhes construtivos e forma de operação destes dispositivos poderão ser encontrados em [20]-[22].

2.1.2.5 Acopladores Ópticos:

Os acopladores ópticos [20][21] são dispositivos puramente ópticos, com número de portas normalmente igual ou maior que três, comumente encontradas em configuração 1x2, 2x2, 2x1 ou mesmo NxN, e que permitem combinar (*combiner*) ou separar (*splitter*) sinais no domínio óptico.

São elementos passivos da rede, não demandando, portanto, qualquer tipo de alimentação elétrica, sendo aplicados como dispositivo para interconexão de enlaces de fibras ópticas.

Construtivamente, constituem-se basicamente em dois tipos [23]: Acoplador de Fibra Fundida e o Acoplador de Guia de Onda. No primeiro caso, parte do sinal de cada uma das entradas transpassa o segmento onde as fibras que o formam foram interligadas por fusão, fazendo com que estes sinais sejam mixados e disponibilizados em ambas as saídas (conforme Figura 3a). Já no segundo caso, a interação entre os sinais nas entradas dos dois guias é função do tamanho da região de acoplamento, da distância entre elas e do índice de refração do material que as separa (Figura 3b).

³ Tipicamente entre 10 e 100 vezes [21]

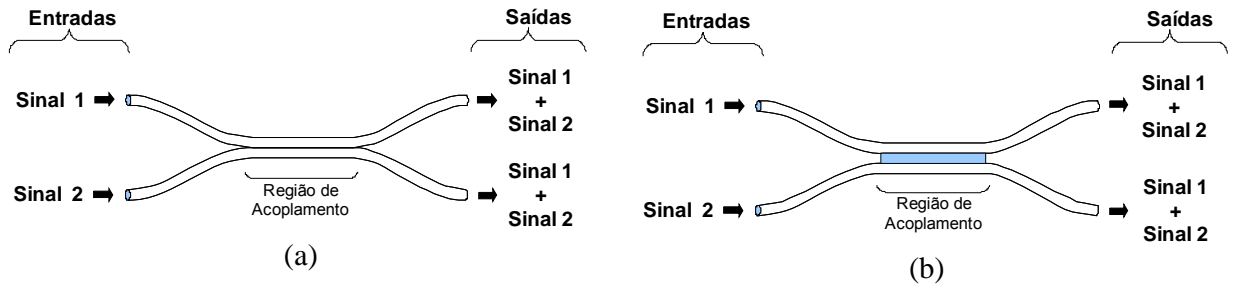


Figura 3. Tipos de acopladores. (a) 2x2 Fibra Fundida e (b) 2x2 Guia de Onda. [23]

Na construção de acopladores NxN, podem ser associados numa rede em cascata acopladores 2x2 (Figura 4a). Todavia, para uma quantidade de portas maior, é construtivamente inviável esta associação, situação em que se faz necessária a construção de acopladores multiporta, também por técnica de fusão, em configuração “estrela” (*star couplers*), como na Figura 4b.

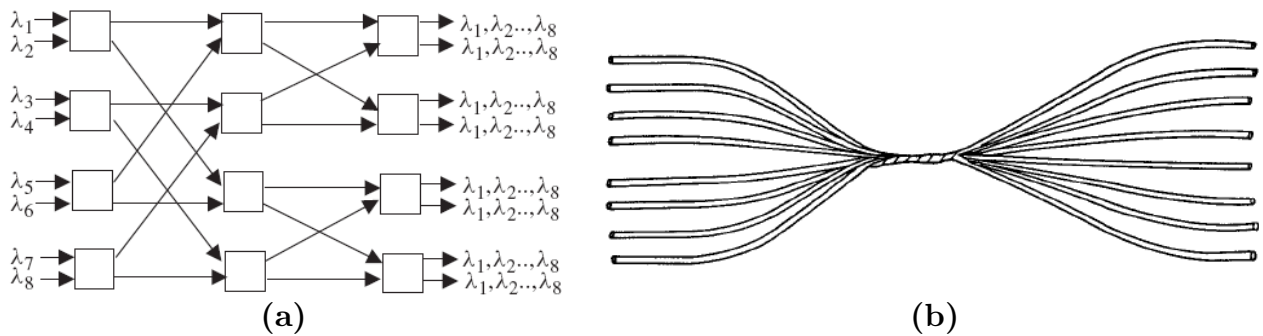


Figura 4. (a) Rede NxN de acopladores 2x2. (b) *Star Coupler*. [23][20]

2.1.2.6 Filtros Ópticos:

Em sistemas ópticos, filtros são freqüentemente utilizados e necessários e têm por objetivo permitir a seleção de uma faixa espectral específica do sinal óptico, seja permitindo sua passagem completa ou seu bloqueio total. Suas aplicações são as mais diversas, como:

- Utilização após uma fonte de sinal do tipo LED para estreitar a largura de banda do sinal gerado;
- Antes de um receptor para selecionar um determinado comprimento de onda em um sinal WDM;
- Em um equipamento de comutação óptica para selecionar qual caminho determinado comprimento de onda deve seguir.

Em relação à sua construção, diversos são os princípios aplicados na construção de filtros ópticos, que podem ser passivos ou ativos. Todavia um princípio é comum a todos: quanto maior a largura espectral coberta pelo filtro (*tuning range*), mais lento será o tempo de seleção do comprimento de onda desejado (*tuning time*). Os tipos mais comuns de filtros são [21]:

- Fabry-Perot (FP): baseados no interferômetro de Fabry-Perot. São filtros mecanicamente ajustáveis, que consistem em uma cavidade ressonante com espelhos semi-reflexivos nas extremidades. Conseguem passar por ele os comprimentos de onda que coincidirem com aqueles de ressonância da cavidade, sendo que os demais anulam-se por interferência destrutiva.
- Grades de Bragg em Fibra (Fibre Bragg Grating Filters – FBG): São os filtros que mais se aproximam dos filtros “ideais”. Ao contrário dos Fabry-Perot, que possuem uma natureza “transmissiva”, pois deixam passar o comprimento de onda selecionado, os filtros FBG têm natureza “reflexiva”, visto que refletem de volta o comprimento de onda selecionado do espectro. Por conta desta natureza, faz-se necessário sua utilização em conjunto com um circulador para que seja possível a extração do sinal desejado.
- Interferômetro de Mach-Zender (MZI): É um exemplo de filtro controlado termicamente. Num MZI, o sinal presente em sua entrada é dividido e conduzido por dois guias de ondas distintos⁴, sendo combinados novamente antes de serem entregues em sua saída. Um elemento termicamente controlado atua sobre um destes guias de onda alterando seu comprimento, o que redundará em uma diferença de fase entre os sinais que percorrem os dois guias de onda. O controle desta diferença pode ser utilizada para bloquear ou permitir a passagem de determinado comprimento de onda.
- Opto-Acústico Ajustável (AOTF): Um sinal sonoro (MHz) altera periodicamente o índice de refração do meio pelo qual propaga-se o sinal luminoso dentro do filtro, o que faz com que atue com uma “grade” (*grating*). A variação desta frequência permite a seleção de um comprimento de onda específico que será capaz de passar pelo filtro, sendo que os demais serão bloqueados.

⁴ Conseqüentemente por caminhos distintos

- Opto-Elétrico Ajustável (EOTF): Baseia-se no mesmo princípio do AOTF, sendo que o índice de refração do meio é agora controlado por meio de um sinal elétrico.
- Cristal Líquido (LC): Tem forma de operação semelhante ao FP, sendo que neste caso a cavidade consiste de cristal líquido. O índice de refração do cristal é controlado por um campo elétrico, permitindo filtrar os comprimentos de onda desejados.

A Tabela 1 a seguir detalha valores típicos da faixa espectral selecionável e do tempo de ajuste para cada um dos tipos de filtros comentados.

Tipo de Filtro	Largura Espectral de Ajuste	Tempo de Ajuste
FP	500 nm	1–10 ms
FBG	fixo	fixo
MZI	>10 nm	1–10 ms
AOTF	~100 nm	~10 μ s
EOTF	10–15 nm	1–10 ns
LC	30–40 nm	0.5–10 μ s

Tabela 1. Características dos tipos de filtros [24]

2.1.2.7 Elementos de Comutação na Rede Óptica:

Uma necessidade comum às redes ópticas é a de se comutar determinado canal de comunicação do sistema WDM de uma fibra para outra. Esta operação pode ser realizada através de conversões O-E-O ou mesmo no domínio óptico.

O *Optical Cross Connect* (OXC) [23] é um comutador NxN com N fibras de entrada e N de saída, que pode comutar qualquer um dos comprimentos de onda de suas fibras de entrada para uma das fibras de saída, podendo ou não haver conversão para outro comprimento de onda⁵ caso necessário.

Um OXC também pode desempenhar a função de *Optical Add/Drop Multiplexer* (OADM) (ver Seção 2.1.2.7.1). Este é um elemento capaz de retirar determinados comprimentos de onda de um sinal advindo de uma das portas de entrada, inserindo novos sinais nestes mesmos comprimentos de onda em uma das saídas, não interferindo nos demais sinais que passam por ele.

⁵ Se equipado com conversores de comprimento de onda, quando a comutação é feita no domínio elétrico ou ainda óptica para *grooming*.

Construtivamente, o OXC é composto de multiplexadores e demultiplexadores ópticos, *switch fabric* e uma CPU. Um diagrama com seus elementos construtivos é mostrado na Figura 5.

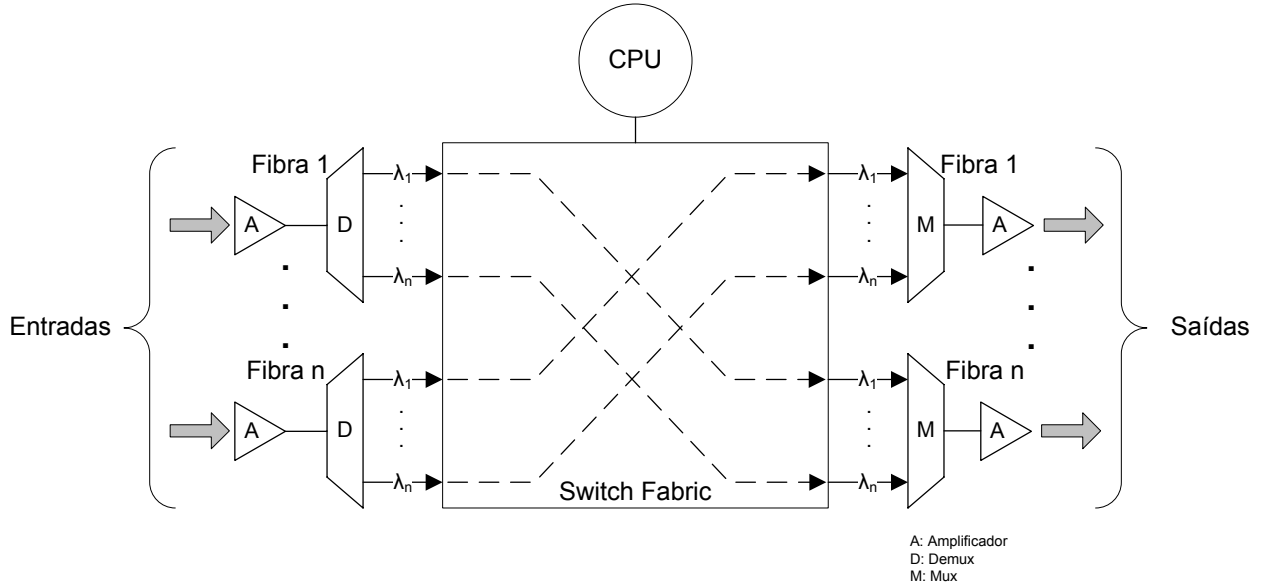


Figura 5. Optical Cross Connect

A CPU tem por missão controlar o *switch fabric* e executar funções de software como sinalização, roteamento e operações de gerência de rede. A função dos demultiplexadores é separar os diversos comprimentos de onda que compõem o sinal que chega por cada uma das entradas, entregando cada um deles em uma porta de entrada diferente do *switch fabric*. Este, por sua vez, redireciona cada comprimento de onda, sob a supervisão da CPU, para as portas de saída. Uma vez presentes nas portas de saída do *switch fabric*, os multiplexadores combinam os diversos comprimentos de onda em um único sinal, que será inserido na fibra óptica correspondente para transmissão.

Recebem a denominação de OXCs “transparentes” aqueles capazes de realizar a comutação e encaminhamento dos sinais ópticos sem a realização de conversões O-E-O. Já os equipamentos em que esta conversão se faz presente, recebem a denominação de OXCs “opacos”. Tecnologias como MEMS (*Microelectromechanical systems*), *Thermal Bubble* e SOA [25] são aplicadas neste sentido.

Muito embora os OXCs totalmente “transparentes” nos surjam como a melhor opção, do ponto de vista da engenharia podemos dizer que os OXCs “opacos” sejam ainda hoje os mais “factíveis” e de implementação mais simples. Possuem, contudo,

restrições de velocidade de operação decorrentes das limitações dos componentes eletrônicos que dele fazem parte.

São características desejáveis dos OXCs [23]:

- Alta velocidade de comutação;
- Baixa perda de inserção⁶ e baixo *crosstalk*⁷;
- Baixa perda dependente de polarização.
- Recursos de conversão de comprimentos de onda, a fim de reduzir probabilidade de bloqueio por “conflito externo”⁸.

2.1.2.7.1 *Optical Add/Drop Multiplexer (OADM):*

Os *Optical Add/Drop Multiplexers*, ou simplesmente OADM, são simplificações dos OXCs, permitindo somente a extração (*drop*) ou inserção (*add*) dos sinais provenientes do/para o nó local (Figura 6). Funcionalmente, são equipamentos semelhantes aos conhecidos muxes *Add/Drop* de sistemas como SDH/SONET [23][25][40], que permitem, em agregados de ordens superiores, a extração e inclusão de novos tributários em praticamente quaisquer taxas, sem necessidade de nenhum tipo de demultiplexação ou intervenção nos demais tributários.

Estas operações de *Add/Drop* em OADMs podem ser realizadas em comprimentos de onda específicos, em grupos de comprimentos de onda ou ainda por fibra de entrada, tornando-o extremamente versátil na comutação de sinais ópticos.

Apesar de ser mais comum encontrarmos switches opacos, a tendência caminha na direção dos comutadores transparentes, já existindo soluções comerciais neste sentido. A vantagem principal dos OADMs transparentes refere-se ao fato destes serem também transparentes a protocolos de quaisquer naturezas ou ainda a taxas de transmissão, o que os torna altamente escalonáveis, úteis em aplicações que envolvam redundância e os fazem ferramentas poderosas em aplicações *carrier class*.

Soluções mistas, congregando OADMs opacos e transparentes, são denominadas redes “translúcidas”, onde são criados domínios de comutação “transparentes” interligados por *gateways* opacos.

⁶ Perda decorrente da presença do OXC na rede.

⁷ “Vazamento” indesejado do sinal de uma porta para outra.

⁸ Situação em que um mesmo λ de entradas distintas precisa seguir pela mesma saída.

O uso dos OADMs reduz enormemente os custos ao eliminar as conversões O-E-O a cada nó. Entretanto, os OADMs comuns são usualmente configurados de forma estática, onde os comprimentos de onda que sofrerão a operação de *drop/add* devem ser conhecidos previamente. Isto levou ao desenvolvimento dos OADMs reconfiguráveis, ou ROADMs, que podem ser dinamicamente configurados permitindo que qualquer comprimento de onda possa ser extraído ou inserido conforme a demanda de tráfego, limitado naturalmente aos tempos de comutação dos dispositivos ópticos envolvidos. Os ROADMs vêm rapidamente se tornando parte das redes metropolitanas atuais [1].

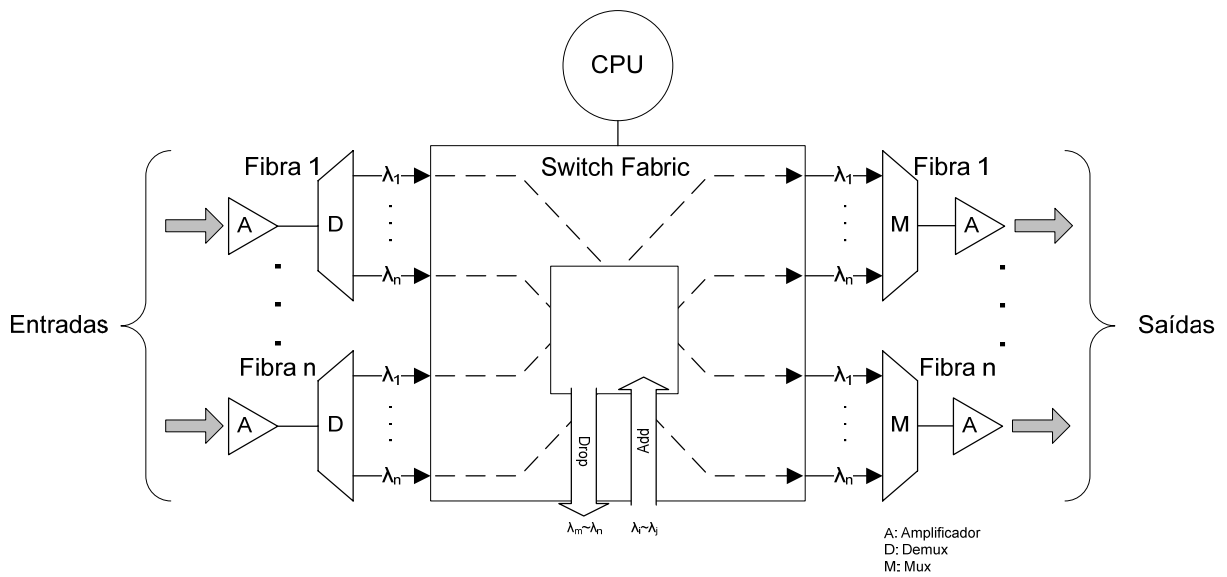


Figura 6. OADM

2.1.3 A Evolução das Redes de Transporte:

Durante a década de 80, tecnologias como SDH/SONET mostravam-se como as tecnologias que seriam a solução para todos os problemas das redes de transporte de dados. Muita discussão foi gerada em torno deste tema, e um sem número de padrões foram lançados.

Com a evolução das redes de transmissão SDH/SONET acabamos por chegar perto do limite da eletrônica dos equipamentos. Surge então, no final da década de 90, como o novo “graal” para as redes de telecomunicações o WDM. A possibilidade de se transmitir múltiplos comprimentos de onda por fibra multiplicava enormemente a capacidade dos sistemas de transmissão, elevando-a à casa dos Tbps.

Sistemas SDH/SONET têm origem nas tecnologias TDM vigentes à época do seu advento. Este fato traz a necessidade de adaptações das estruturas de dados de naturezas diversas, como o IP, quando necessária sua transmissão nestas redes. Faz-se necessária também a adaptação das taxas de transmissão dos sinais não diretamente compatíveis com as velocidades padronizadas pela arquitetura. As redes WDM, por outro lado, “abstraem” todos estes fatores, sendo completamente transparentes às taxas de transmissão e protocolos, permitindo a coexistência de sinais das mais diversas naturezas em uma mesma fibra óptica.

A explosão da demanda de tráfego observada na última década, fortemente influenciada pela Internet, aliada à mudança das características espaciais e temporais das demandas de tráfego, vêm sendo a base para a criação de novas estratégias dinâmicas para transmissão de dados nas redes de telecomunicações. Apesar da evolução das tecnologias dos equipamentos WDM, decorrente da intensa pesquisa na área nas últimas décadas, os custos dos elementos comutadores ópticos (OXC's) ainda são bastante altos, impedindo a popularização destas redes. Soma-se ainda que o aumento na demanda por largura de banda não foi acompanhado pelo equivalente aumento de receita das operadoras, o que nos leva à necessidade de desenvolvimento de soluções de custo ainda mais baixo.

A demanda gerada tanto por parte dos fabricantes quanto operadoras, por buscarem sempre soluções de alta capacidade aliadas a baixo custo, impeliu os órgãos normatizadores e os fabricantes, ao desenvolvimento de um padrão para redes de dados *carrier class* baseados no popular ethernet, padrão “de fato” quando falamos em redes LAN. Discutiremos com mais detalhes esta arquitetura na seção seguinte.

2.2 Redes Ethernet

O padrão ethernet conecta hoje milhões de usuários ao redor do mundo, e é, sem sombra de dúvidas, a tecnologia de rede de maior sucesso da história. Mesmo durante os altos e baixos do mercado de tecnologia da informação, seu desenvolvimento sempre continuou movendo-se em frente.

É de conhecimento público que a arquitetura ethernet, criada pelo IEEE⁹ sob o código IEEE 802, é um padrão “de fato”. Muito embora esta arquitetura tenha sido originalmente concebida como uma solução não gerenciável para interconectar usuários em redes locais, em poucas décadas de vida dominou praticamente todo o parque voltado a redes locais (LANs) e caminha a passos largos na direção da MAN/WAN [1]. Seu sucesso deve-se, principalmente, a fatores como:

- Enorme simplicidade,
- Escalabilidade (10M / 100M / 1G / 10G),
- Constante desenvolvimento,
- Grande quantidade de fabricantes,
- Ampla padronização,
- Facilidade de migração,
- Interoperabilidade entre os padrões que se sucedem, e
- Baixo custo (eficiência econômica).

Os serviços tradicionalmente ofertados pelas arquiteturas ethernet padrão eram baseados nas premissas de “melhor esforço” (*best effort*). Embora esta característica tenha facilitado a sua difusão em um primeiro momento, dada sua simplicidade, hoje não mais é capaz de atender à crescente demanda por serviços gerenciáveis e critérios de QoS. Fez-se necessário então que a arquitetura evoluísse, a fim de assumir características semelhantes às tecnologias utilizadas pelas operadoras de telecomunicações.

2.2.1 Carrier Ethernet:

Desde seu advento, a tecnologia ethernet provou e comprovou sua capacidade de evolução e adaptação com base nas demandas de mercado. Evoluiu dos meros 10Mbps para até 10 ou 100Gbps [34], atualmente em estudo, seja sobre meios metálicos¹⁰ ou ópticos.

Ao longo dos anos, foi inevitável que se portasse o IEEE 802, através de extensões nos padrões, à rede MAN/WAN. A enorme demanda, gerada tanto por

⁹ www.ieee.org

¹⁰ Suportado por alguns padrões apenas

parte dos fabricantes quanto operadoras, por buscarem sempre soluções de alta capacidade aliadas a baixo custo, impeliu os órgãos normatizadores e os fabricantes ao desenvolvimento de uma família de padrões voltados a aplicações *carrier class*. Isto se deveu ao fato de que a arquitetura ethernet, concebida originalmente para o universo das LANs, não dispunha de nenhum dos recursos inerentes e imprescindíveis às redes das operadoras, como: [19]

- Funções OAM - *Operation, Administration and Maintenance*,
- Proteção,
- Qualidade de Serviço (QoS),
- Escalabilidade.

O *Carrier Grade Ethernet*, *Carrier Class Ethernet* ou simplesmente *Carrier Ethernet*, nada mais é que um grupo de serviços padronizados definido por um conjunto de atributos, descritos na Seção 2.2.2. Estes serviços podem ser oferecidos não apenas sobre estruturas ethernet nativas, mas também sobre outras modalidades de transporte como SDH/SONET, MPLS, etc.

Muitos dos esforços de padronização do *carrier ethernet*, especialmente no que tange aos serviços, vem sendo conduzidos pelo Metro Ethernet Fórum – MEF¹¹. Ele também definiu modelos de referência para os serviços a serem ofertados. Estas especificações também estão alinhadas com as feitas pelo ITU-T¹² em sua recomendação G.8011 [35].

A Figura 7 demonstra o modelo de camadas especificado pelo MEF para arquiteturas metro ethernet.

¹¹ www.metroethernetforum.com

¹² www.itu.int

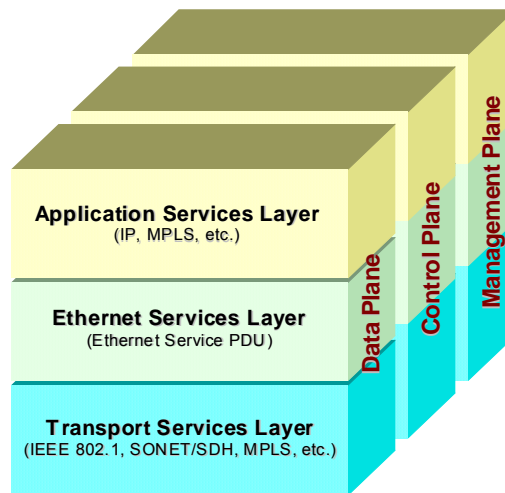


Figura 7. Modelo de camadas definido pelo MEF. [7]

2.2.2 Atributos do Carrier Ethernet:

Conforme mencionado na seção anterior, estão definidos 5 atributos para a arquitetura, conforme mostrado na Figura 8.

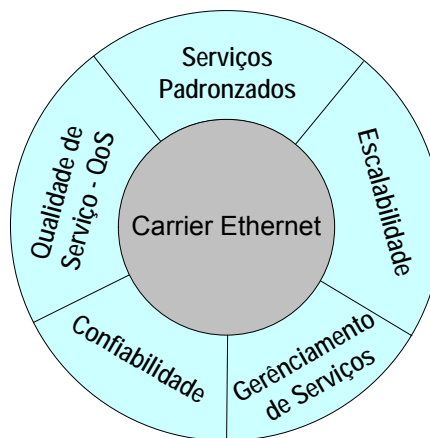


Figura 8. Atributos da arquitetura Metro Ethernet. [8].

2.2.2.1 Tipos Padronizados:

O MEF [8] tem atualmente definidos, com caráter normativo, três tipos básicos de serviços:

- Ethernet Line (**E-LINE**):
 - Conexão ethernet ponto-a-ponto virtual entre duas *User-Network Interfaces* – UNI;
 - Conforme Figura 9a.

- Ethernet LAN (**E-LAN**):
 - Conexão ethernet virtual Multiponto entre múltiplas UNI's.
 - É a alternativa mais flexível, permitindo criar-se virtualmente qualquer arranjo de conectividade entre as UNIs.
 - Conforme Figura 9b.
- Ethernet Tree (**E-TREE**):
 - Conexão ethernet Multiponto baseada em nó raiz (*root*).
 - Cada UNI raiz (root-UNI) troca dados com uma UNI folha (leaf-UNI) através de um ponto raiz (*root*). O *root* age como um ponto de troca, que concentra e redistribui o tráfego destinado às leafs-UNI. Um quadro enviado por uma leaf-UNI destinado a outra leaf-UNI não será entregue. Útil para serviços de acesso à internet e aplicações IP-TV e *vídeo on demand*.
 - Configurações com dois ou mais “*roots*” também são aceitas, criando-se a possibilidade de se implementar cenários com recursos de redundância.
 - Conforme Figura 9c.

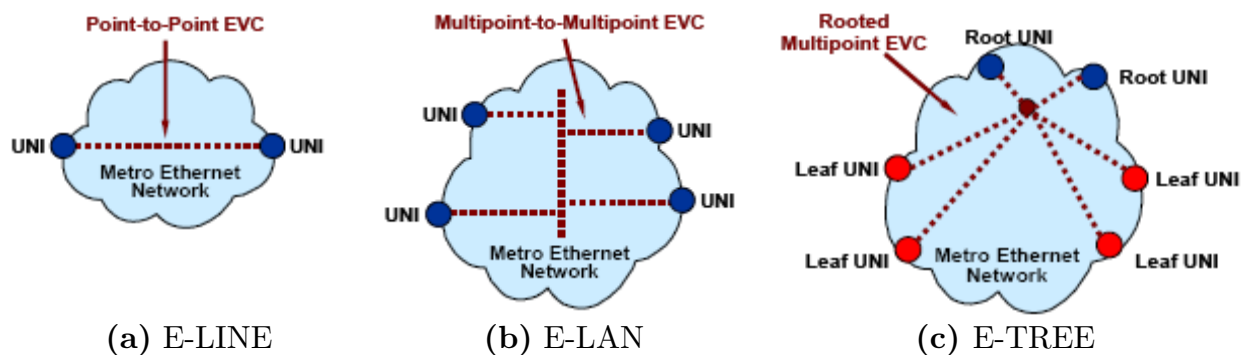


Figura 9. Tipos de serviços padronizados pelo MEF. [8]

2.2.2.2 Serviços Padronizados:

O “Framework de Definição de Serviços Ethernet”, do MEF [8], provê um modelo para especificação de serviços. Os tipos de serviços (ver Seção 2.2.2.1) são modelos “genéricos” usados como base para a criação dos serviços em si. A cada um destes tipos é associado um conjunto de atributos que definem então as características do serviço. Além disso, cada um destes atributos possui um conjunto de parâmetros que vão definir as características individuais de cada serviço ofertado, com base nas

necessidades de cada situação. A Figura 10 mostra a lógica desta associação na formação dos serviços.

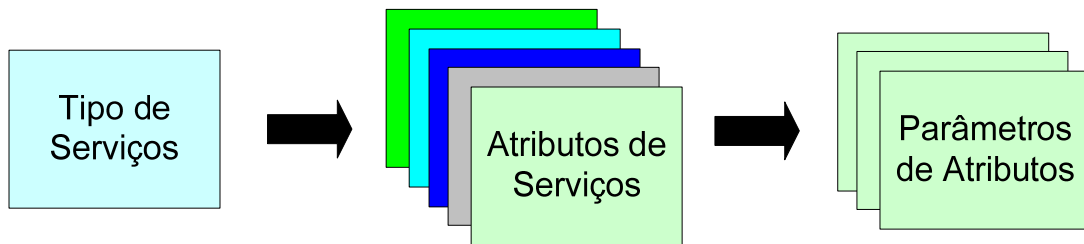


Figura 10. Formação dos serviços ethernet. [8]

Com base no tipo **E-LINE**, duas modalidades de serviço são definidas:

- Ethernet Private Line Service (**EPL**): Um EVC mapeado em uma UNI dedicada, não permitindo qualquer tipo de multiplexação. Conforme Figura 11a.
- Ethernet Virtual Private Line Service (**EVPL**): Um ou mais circuitos lógicos são multiplexados em cada UNI, ou seja, múltiplos EVC's por UNI. Conforme Figura 11b.

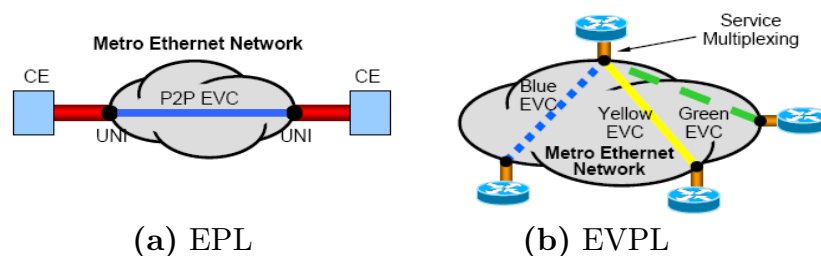


Figura 11. Serviços baseados no tipo **E-LINE**. [8]

Já os serviços baseados no tipo **E-LAN** estão definidos como:

- Ethernet Private LAN Service (**EP-LAN**): As UNIs de cada rede de usuário são associadas a fim de formarem uma única LAN multiponto. Conforme Figura 12a.
- Ethernet Virtual Private LAN Service (**EVP-LAN**): Possibilita a definição de EVCs multiponto (MP2MP) multiplexados sob uma mesma UNI, permitindo a definição de arranjos complexos contendo múltiplas LANs virtuais. Normalmente é utilizada a VLAN_ID na identificação dos EVCs individuais. Conforme Figura 12b.

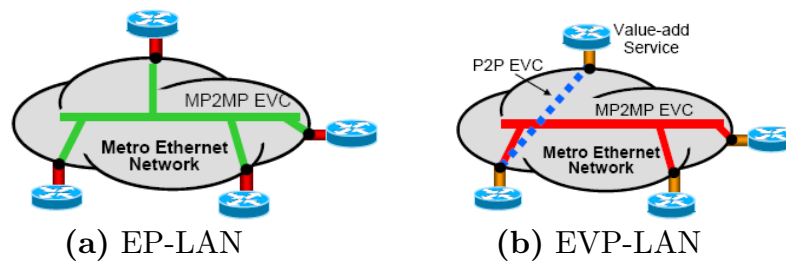


Figura 12. Serviços baseados no tipo **E-LAN**. [8]

Para o tipo **E-TREE**, estão padronizados os seguintes serviços:

- Ethernet Private Tree Service (**EP-TREE**): O tráfego originário das UNIs clientes é agrupado em um determinado ponto da rede (*root*) e distribuído aos demais (*leafes*). Um EVC por UNI. Conforme Figura 13a.
- Ethernet Virtual Private Tree Service (**EVP-TREE**): Neste serviço múltiplos *rooted-multipoint-EVCs* (RMP-EVCs), multiplexados em cada uma das UNIs, são agrupados em um ou mais nós *root*. Nesta modalidade podem coexistir com este serviço outras modalidades de serviço, como **EVP-LAN** ou **EVPL**. Conforme Figura 13b.

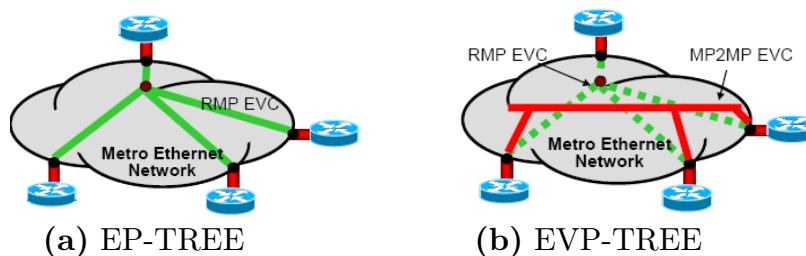


Figura 13. Serviços baseados no tipo **E-TREE**. [8]

Nestas modalidades diversos atributos de serviço podem ser definidos, como:

- Capacidade (velocidade) da conexão física (UNI);
- *Committed Information Rate* (CIR);
- *Committed Burst Size* (CBS);
- *Excess Information Rate* (EIR);
- *Excess Burst Size* (EBS);
- Requisitos de QoS diferenciados por EVC;
- Dentre outros.

A Tabela 2 a seguir consolida a relação de serviços padronizados pelo MEF.

Tipo de Serviço	Port-Based (Um EVC lógico por enlace)	VLAN-Based (Múltiplos EVC por enlace, identificados pela VLAN ID)
E-Line (point-to-point EVC)	Ethernet Private Line (EPL)	Ethernet Virtual Private Line (EVPL)
E-LAN (multipoint-to-multipoint EVC)	Ethernet Private LAN (EP-LAN)	Ethernet Virtual Private LAN (EVP-LAN)
E-Tree (rooted multipoint EVC)	Ethernet Private Tree (EP-TREE)	Ethernet Virtual Private Tree (EVP-Tree)

Tabela 2. Serviços padronizados pelo MEF

2.2.2.3 Escalabilidade:

Uma das diferenças primordiais entre a utilização da arquitetura ethernet nas LANs corporativas e nos provedores de serviços é a escala. Em redes tipo *carrier*, o número de usuários é milhares de vezes maior que nas LANs, além de um número de conexões entre nós exponencialmente proporcional. Diversos tipos de serviços, com possibilidade de características distintas entre si, podem ser implementados e escalonados em uma mesma UNI.

Já em relação à geografia, redes *carrier class* necessitam usualmente alcançar distâncias metropolitanas, ou mesmo interestaduais ou internacionais, tarefa possível graças à camada física baseada em sistemas ópticos de comunicação.

Além disso a oferta de serviços para estas redes devem permitir em uma única interface alta granularidade, partindo da casa dos 1Mbps, chegando aos 10 ou mesmo aos 100Gbps [34] em incrementos de 1Mbps, através de configuração totalmente remota.

2.2.2.4 Gerenciamento de Serviços:

Outro atributo que diferencia o *carrier ethernet* é a capacidade de monitoramento, diagnóstico e gerenciamento centralizado. Gerenciar diversos usuários e redes em áreas geográficas distintas demandou o desenvolvimento novos padrões, a fim de atender as novas necessidades.

Para desempenhar este papel, são necessárias ferramentas que desempenhem as seguintes funções:

- Rápido provisionamento de serviços;

- Diagnóstico de problemas de conectividade apontados pelos usuários;
- Diagnóstico de falhas em qualquer ponto da rede, seja nos acessos ou no *core*;
- Geração de medidas de performance e de atendimento de SLA.

Os atuais padrões responsáveis por endereçar estes problemas serão discutidos na Seção 2.2.3 e suas subseções.

2.2.2.5 Confiabilidade:

As arquiteturas ethernet padrão, utilizadas em redes locais, até então ofertavam serviços do tipo *best-effort*. Soluções *carrier class*, por outro lado, devem oferecer serviços de alta confiabilidade. Para tanto deve ter a capacidade de detectar e recuperar-se rapidamente de falhas, estejam elas localizadas em nós, enlaces ou nos serviços.

Os padrões vigentes *carrier ethernet* prevêm um intervalo de recuperação para a arquitetura inferior a 50ms [36], o que atende aos critérios mais rígidos de disponibilidade para aplicações de missão crítica ou para serviços de voz e vídeo. Este intervalo é similar, ou mesmo melhor, que o ofertado pela arquitetura SONET, até então o *benchmark* dentre as soluções *carrier class*. Esta necessidade de uma rápida atuação em situações de falha demandou o desenvolvimento de novos métodos de implementação de proteção, sejam os substitutos ao *Spanning Tree Protocol* como o RSTP [27] e o MSTP [28], seja em abordagens como *Link Aggregation* [33] e ITU-T G. 8031 [36], ou ainda através da utilização de redes de transporte que nativamente incluam a funcionalidade, como SONET [40].

O Metro Ethernet Fórum especifica em [6] os requisitos e características dos métodos de proteção padronizados para a *carrier ethernet*.

2.2.2.6 Qualidade De Serviço QoS:

A garantia dos requisitos de QoS é fator primordial em arquitetura *carrier class*, visto que tecnologias ditas “legadas” como ATM, SDH/SONET e Frame Relay possuem nativamente esta capacidade. É natural que se tornasse obrigatório o desenvolvimento destas funcionalidades para o *carrier ethernet*.

Conforme mencionado nas Seções 2.2.2.1 e 2.2.2.2, a especificação do MEF para redes *carrier* oferece uma variada gama de opções de atributos e requisitos de QoS, cujo desafio principal baseia-se no fato de ser necessário garantir que estes requisitos mantenham-se atendidos, mesmo com a presença de milhares de sessões simultâneas de usuários ativos.

Dentre os diversos atributos vinculados à QoS, podemos citar:

- Vazão garantida (CIR);
- Taxa de erro (perda de pacote) máxima;
- Atraso fim a fim (*delay*) máximo;
- Variação do atraso fim a fim (*jitter*).

As funcionalidades atualmente já padronizadas para o ethernet serão discutidas em mais detalhes na seção seguinte.

2.2.3 Padrões Envolvidos:

Com o fito de atender à demanda de soluções ethernet voltadas à WAN, os organismos de padronização, tais como o próprio IEEE ou mesmo o ITU, IETF e MEF, vêm definindo uma série de padrões que objetivam dotar a arquitetura das funcionalidades necessárias às aplicações *carrier class*. As seções seguintes descrevem alguns dos padrões definidos até o momento bem como alguns em fase de especificação.

A Figura 14 a seguir exhibe panorama de alguns dos padrões envolvidos.

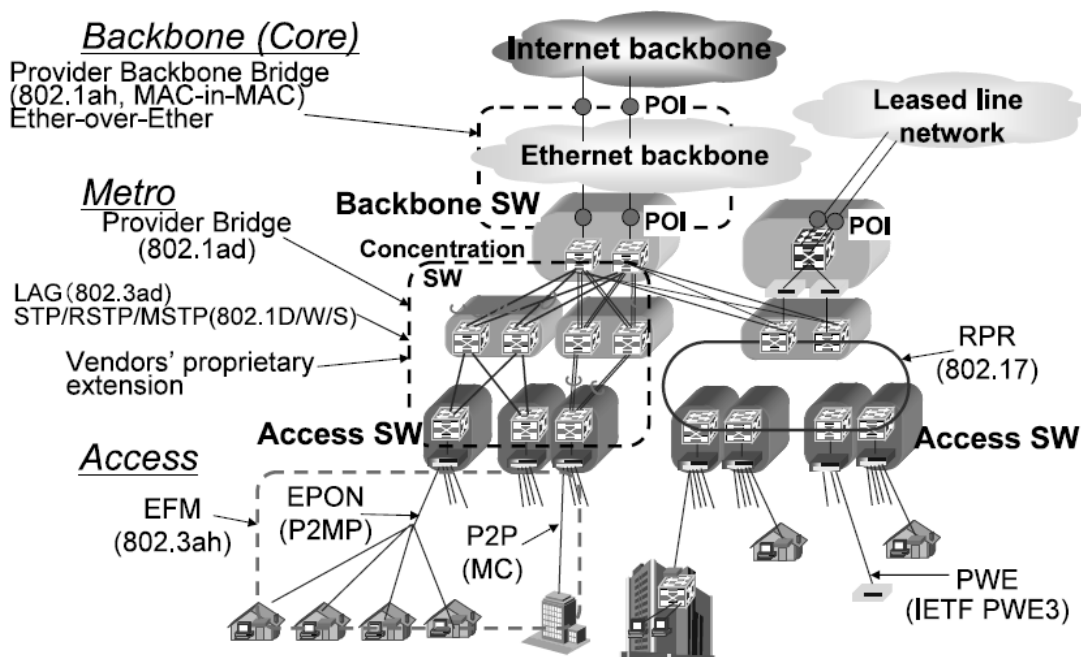


Figura 14. Padrões Relacionados à Carrier Class Ethernet. [3]

A distribuição destes padrões entre os diversos organismos de normatização pode ser verificada na Tabela 3.




Standards Body	Ethernet Services	Architecture/Control	Ethernet OAM	Ethernet Interfaces
	-	<ul style="list-style-type: none"> 802.3 – MAC 802.3ar – Congestion Management 802.1D/Q – Bridges/VLAN 802.17 – RPR 802.1ad – Provider Bridges .1ah – Provider Backbone Bridges .1ak – Multiple Registration Protocol .1aj – Two Port MAC Relay .1AE/af – MAC / Key Security .1aq – Shortest Path Bridging 	<ul style="list-style-type: none"> 802.3ah – EFM OAM 802.1ag – CFM 802.1AB – Discovery 802.1ap – VLAN MIB 	<ul style="list-style-type: none"> 802.3 – PHYs 802.3as – Frame Expansion
MEF	<ul style="list-style-type: none"> MEF 10.1 – Service Attributes MEF 3 – Circuit Emulation MEF 6.1 – Service Definition MEF 8 – PDH Emulation MEF 9 – Test Suites MEF 14 – Test Suites Services Phase 2 	<ul style="list-style-type: none"> MEF 4 – Generic Architecture MEF 2 – Protection Req & Framework MEF 11 – UNI Req & Framework MEF 12 – Layer Architecture MEF 20 – UNI Type 2 	<ul style="list-style-type: none"> MEF 7 – EMS-NMS Info Model MEF 15 – NE Management Req MEF 17 – Service OAM Requirements & Framework Service OAM Protocol – Ph. 1 Performance Monitoring 	<ul style="list-style-type: none"> MEF 13 – UNI Type 1 MEF 16 – ELMI E-NNI
	<ul style="list-style-type: none"> G.8011 – Services Framework G.8011.1 – EPL Service G.8011.2 – EVPL Service G.asm – Service Mgmt Arch G.smc – Service Mgmt Chnl 	<ul style="list-style-type: none"> G.8010 – Layer Architecture G.8021 – Equipment model G.8010v2 – Layer Architecture G.8021v2 – Equipment model Y.17ethmpls – ETH-MPLS Interwork 	<ul style="list-style-type: none"> Y.1730 – Ethernet OAM Req Y.1731 – OAM Mechanisms G.8031 – Protection Y.17ethqos – QoS Y.ethperf – Performance 	<ul style="list-style-type: none"> G.8012 – UNI/NNI G.8012v2 – UNI/NNI
	-	-	<ul style="list-style-type: none"> TMF814 – EMS to NMS Model 	-

Tabela 3. Padronização Carrier Ethernet. Fonte: MEF.

2.2.3.1 IEEE 802.3ah: Ethernet in the First Mile – EFM

O padrão IEEE 802.3ah, conhecido com “*Ethernet in the First Mile* – EFM”, foi lançado em 2004, incorporado ao IEEE 802.3-2005 [33] e vem sendo promovido pelo *Ethernet in the First Mile Alliance* (EFMA). Ele especifica um padrão de rede de acesso, ou última milha, operando nativamente sob ethernet.

Acredita-se que o EFM venha a substituir tecnologias de acesso atualmente em uso como HDSL, E1, STM-1, OC-03, Frame Relay, etc, simplificando enormemente a conexão com a rede de usuário, visto a eliminação da necessidade das conversões de protocolo entre as redes de acesso e de transporte, desnecessárias e custosas.

O padrão IEEE 802.3ah define três topologias de acesso:

- **EFM-C:** Par metálico (P2P);
- **EFM-F:** Fibra monomodo (P2P);
- **EFM-P:** Rede óptica passiva Ponto-Multiponto-P2MP (a versão EFM do EPON);
- **EFM-H:** Solução híbrida mesclando óptica e metálica.

Também estão especificados neste padrão funções de Operação, Administração e Manutenção (OAM) adicionais, que implementam recursos de monitoramento de performance, teste de *loopback* e detecção/isolamento de falhas.

2.2.3.2 IEEE 802.1ad: Provider Bridges – PB

O padrão IEEE 802.1ad, denominado *Provider Bridges* [30], também conhecido como “VLAN Tagging”, “Stacked VLAN” ou simplesmente “Q-in-Q”, foi definido em 2006 sob a forma de um “*amendment*” ao IEEE 802.1Q-2005.

Ele estendeu funcionalidades do padrão original de VLANs [28] e duplicou o tamanho do campo “VLAN TAG”, através do “empilhamento” de tags, objetivando suportar um maior número de redes de assinantes e clientes no núcleo da rede da operadora.

Esta duplicação da VLAN_TAG consiste na definição de dois tipos de tags:

- Service-VLAN Tag, ou **S-TAG**: Atribuída pela operadora para possibilitar identificar os clientes individualmente, bem como separar os recursos de rede deste cliente dos demais;
- Customer-VLAN Tag, ou **C-TAG**: Utilizada pelos assinantes para

identificar suas próprias redes internas.

O momento em que um determinado quadro de usuário adentra a rede da operadora, através de seu nó de ingresso (*ingress node*), as S-TAG's são inseridas no quadro antes da C-TAG do usuário (Figura 15). A rede da operadora passa então a encaminhar o quadro com base na informação desta S-TAG em conjunto com o endereço MAC destino original do quadro.

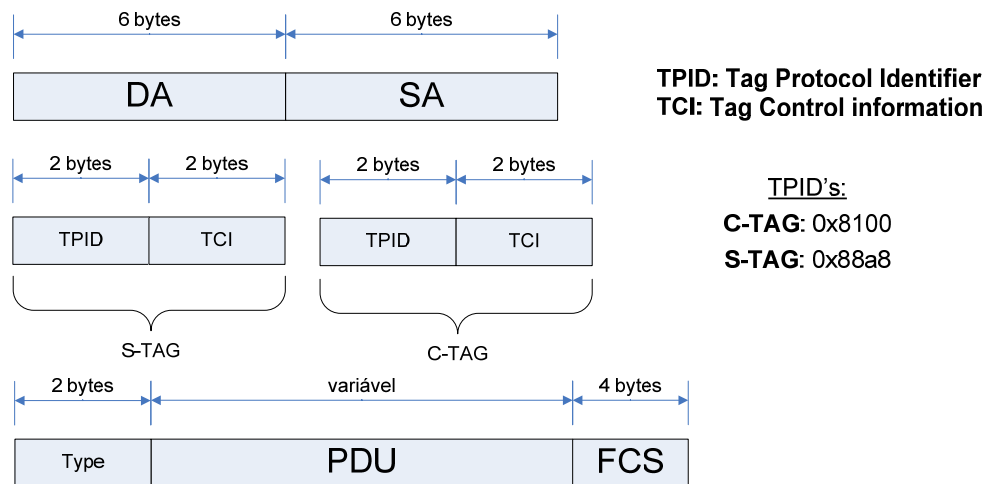


Figura 15. Quadro 802.1ad

Ao chegar ao nó de egresso da rede da operadora (*egress node*), o S-TAG é retirado e o quadro é entregue à rede destino do assinante, na sua forma original.

A Figura 16 ilustra as seguintes situações de uso do Q-in-Q:

- Provider Bridge A: duas interfaces LAN de usuário, fisicamente separadas, são multiplexadas em um único acesso (UNI) através da utilização de uma S-TAG, identificando cada um dos canais separadamente.
- Provider Bridge B: uma única interface LAN de usuário utilizando dois acessos a fim de se obter redundância;
- Provider Bridge C: mapeia as VLANs do usuário em C-TAGs equivalentes, podendo prover serviços distintos em S-VLANs distintas (e SLAs distintos) para cada VLAN do usuário.

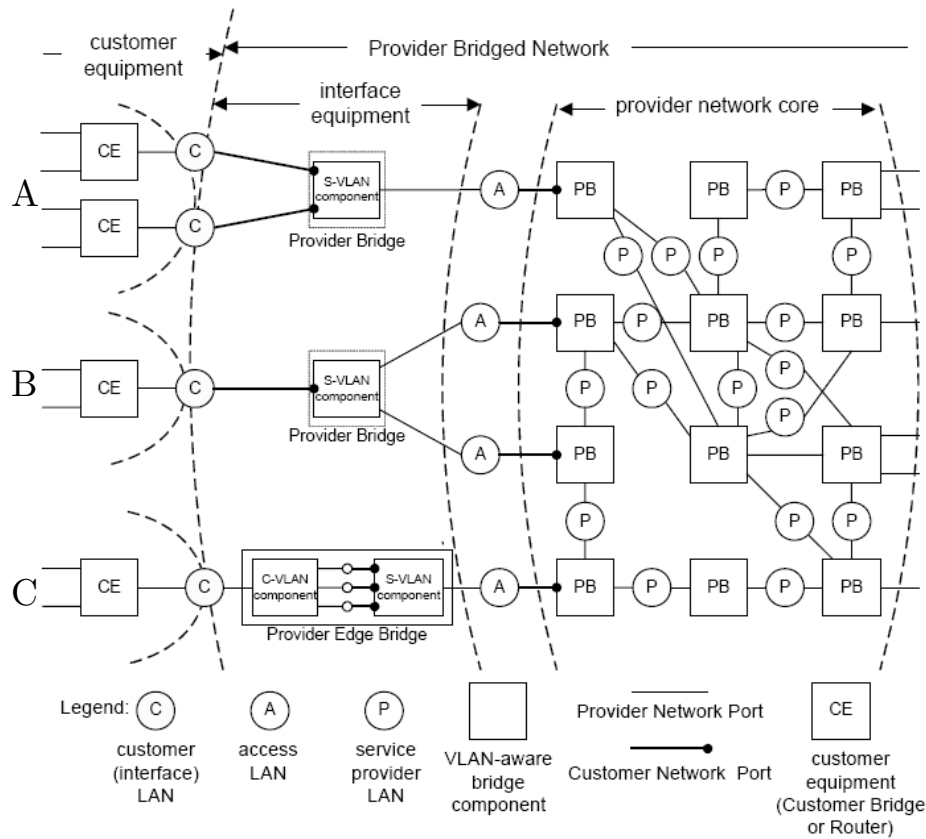


Figura 16. Exemplos de utilização do Provider Bridges. [30]

Apesar das novas funcionalidades inseridas pelo Q-in-Q, este método traz alguns problemas em sua implementação. O primeiro deles é que todos os switches da rede da operadora devem ser capazes de armazenar uma grande quantidade de endereços MAC, pois todos os endereços de usuários precisam ser conhecidos para que os quadros sejam corretamente encaminhados até a rede destino.

Outra restrição importante é que o campo S-TAG está limitado à identificação de apenas 4094 VLANs [30], o que restringe em muito sua utilização como alternativa para redes *carrier class*.

Além disso, outro problema relacionado ao Q-in-Q é quando da transmissão de mensagens de protocolos específicos utilizados na arquitetura ethernet, tais como o STP, OAM, etc. Estes protocolos utilizam endereços MAC destino padrão, que poderiam ser confundidos pela rede da operadora como sendo mensagens de controle dela própria. Isto faz com que quadros desta natureza sejam descartados no nó de ingresso e não possam ser transparentemente encaminhados pela rede da operadora até a rede destino do usuário.

Os problemas apontados acabam por gerar sérias restrições de escalabilidade para o padrão, e tornam esta solução normalmente aplicável apenas por grandes corporações como arquitetura de *bridging* na construção de redes MAN corporativas.

2.2.3.3 IEEE 802.1ah: Provider Backbone Bridge – PBB

Visto que o Q-in-Q possuía sérias restrições em sua utilização como tecnologia *carrier class*, o padrão IEEE 802.1ah, denominado *Provider Backbone Bridge – PBB* [32], também conhecido como “Mac-in-Mac”, ou simplesmente “M-in-M”, foi proposto pelo IEEE com o objetivo de saná-las.

O M-in-M estende o 802.1Q-2005, complementando as falhas do Q-in-Q e implementando uma arquitetura multicamadas.

Utiliza um esquema de tunelamento baseado em endereços MAC da operadora (provider-MAC), no qual um quadro do usuário, em sua admissão em um *ingress node* qualquer da rede, é encapsulado e ganha um novo cabeçalho MAC. Em consequência disso o quadro passa a ter novos campos SA e DA inseridos, identificados como B-SA e B-DA, que correspondem aos endereços dos *ingress node* e *egress node*, respectivamente.

O formato do quadro M-in-M pode ser observado na Figura 17.

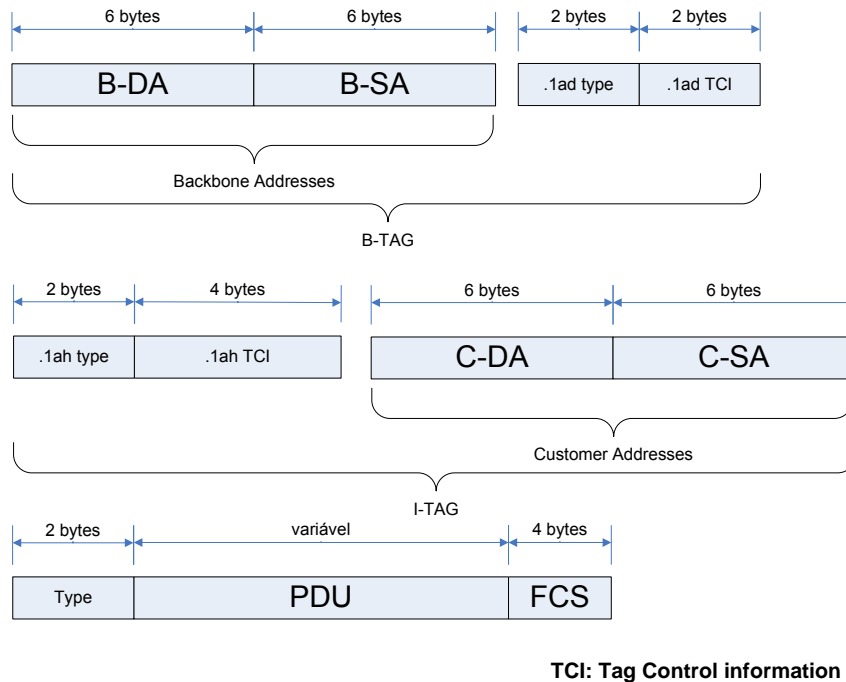


Figura 17. Quadro IEEE 802.1ah

Para o encaminhamento dos quadros, os *core switches* verificam apenas o cabeçalho referenciado por B-TAG, que contém endereços MAC dos nós de entrada (B-SA) e saída (B-DA) da rede da operadora. Nesta abordagem, a quantidade de endereços armazenados nas tabelas dos *core switches* reduz-se enormemente, uma vez que apenas os endereços MAC dos *ingress* e *egress nodes* precisam ser memorizados.

O M-in-M amplia o espaço de endereçamento do usuário (VLAN TAG) de 4096 para 16 Milhões ao agrupar os campos “.1ad B-Tag” e “.1ah I-Tag” (VLAN TAGs) como forma de identificação dos assinantes.

2.2.3.4 IEEE 802.1Qay: Provider Backbone Bridge Traffic Engineering – PBB-TE

A fim de endereçar restrições relativas à implementação de proteção em redes ethernet MAN/WAN, o IEEE iniciou grupo de trabalho para especificar um padrão que permitisse atender a esta demanda. Esta especificação, ainda em andamento (*draft*), é baseada na recomendação ITU-T G.8031 (discutida a seguir na Seção 2.2.3.5). Trata-se de extensão ao IEEE 802.1Q-2005 [28].

No grupo de trabalho IEEE o padrão recebeu o código IEEE 802.1Qay [29] e foi denominado “*Provider Backbone Bridge Traffic Engineering* – PBB-TE”.

O PBB-TE, que tem denominação genérica de “Provider Backbone Transport - PBT”, é uma variação do PBB, discutido na Seção 2.2.3.3, que irá prover as operadoras de recursos engenharia de tráfego, permitindo-se, por exemplo, a especificação de caminhos lógicos para encaminhamento dos fluxos, e serviços ponto-a-ponto orientado a conexão com proteção 1+1.

2.2.3.5 ITU-T G.8031: Ethernet Protection Switching

O recurso de proteção (redundância) é funcionalidade indispensável para provimento de serviços *carrier class*.

Através da recomendação G.8031, denominada “*Ethernet Protection Switching*” o ITU-T especifica arquiteturas para implementação desta funcionalidade em redes Ethernet, visto que a alternativa baseada no *Spanning Tree* é inviável para implementação em provedores de serviços.

A recomendação especifica duas entidades de transporte: “*working*”, que é o caminho principal, ou ativo, e o “*protection*” que é o caminho alternativo, ou de proteção.

Para cada direção de transmissão, o nó que encabeça o circuito é capaz de realizar a operação de *bridging* do tráfego a ser transmitido, fazendo com que uma “cópia” do tráfego enviado pelo caminho ativo seja também enviada pelo caminho de proteção. O papel do nó que termina o circuito é o de “*selector*” (seletor), sendo ele capaz de decidir qual sinal transmitido será recebido, seja o proveniente do caminho ativo ou o de proteção. No caso de sistemas bidirecionais, os nós de terminação desempenham ambas as funções de “*bridge*” ou “*selector*” simultaneamente.

As seguintes arquiteturas de proteção estão especificadas na recomendação:

- 1+1 :
 - Nó que encabeça o circuito faz *bridging* do tráfego entre o caminho “ativo” e “proteção”, permanente e simultaneamente;
 - Nó de terminação é quem decide pela recepção por um dos dois caminhos.
- 1:1 :
 - Nó que encabeça o circuito só realiza *bridging* quando a funcionalidade de proteção é acionada.

Qualquer uma das arquiteturas pode ser implementada em cenários de comunicação unidirecional ou bidirecional.

Outra funcionalidade especificada na recomendação é relativa à “reversibilidade” do tráfego em proteção para o caminho ativo. Na modalidade “reversível” (*revertive operation*), uma vez que a condição de falha tenha sido restaurada, o tráfego é novamente comutado para o caminho “ativo”. Já na modalidade “não reversível”, (*non-revertive operation*), o caminho de proteção permanece recebendo o tráfego mesmo após a restauração do caminho principal, até que seja administrativamente comandado o seu retorno.

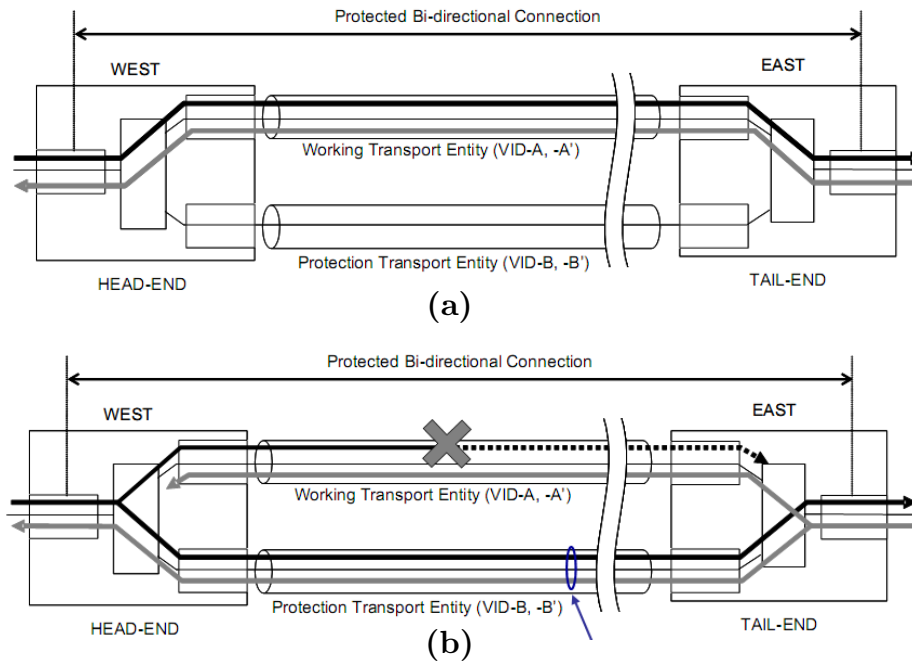


Figura 18. Exemplo ITU-T G.8031. (a) Circuito bidirecional em estado normal. (b) Circuito bidirecional em estado de falha. [36]

A Figura 18 exemplifica um esquema de proteção 1+1 bidirecional em condição normal (a) e em condição de falha (b), tendo sido optado por fazer a comutação de ambos os fluxos (transmissão e recepção) para o caminho de proteção.

2.2.3.6 IETF:

Também o IETF¹³ vem patrocinando alguns padrões (RFCs) relativos às redes ethernet. Dentre os vários em curso, podemos citar os drafts “*GMPLS Control of Ethernet*” [42] e “*GMPLS Ethernet Label Switching Architecture and Framework*” [41]. Ambos cuidam de especificar extensões ao protocolo GMPLS que permitam controlar o estabelecimento de conexões em redes ethernet baseadas no padrão em desenvolvimento PBB-TE (IEEE 802.1Qay).

2.2.3.7 MEF6.1: Ethernet Services Definition - Phase 2

O Metro Ethernet Forum vem focando sua normatização relativa à *carrier ethernet* na especificação de um framework de serviços.

¹³ www.ietf.org

Conforme detalhado na Seção 2.2.2, estão definidos, com caráter normativo, três tipos de serviços ethernet:

- Ethernet Line (**E-LINE**): Conexão ethernet ponto-a-ponto virtual entre duas User Network Interfaces – UNI;
- Ethernet LAN (**E-LAN**): Conexão ethernet virtual Multiponto entre múltiplas UNI's.
- Ethernet Tree (**E-TREE**): Conexão ethernet Multiponto baseada em nó raiz (*root*);

2.2.3.8 MEF2: Requirements and Framework for Ethernet Service Protection in Metro Ethernet Networks

Nesta especificação [6], o MEF caracteriza um modelo de referência e um framework para implementação de funcionalidades de proteção em redes metro ethernet.

A MEF2 considera os seguintes mecanismos de proteção:

- Aggregated Line and Node Protection (**ALNP**) service:
 - Provê mecanismos de proteção contra falhas no enlace local e em nós específicos da rede, através da definição de caminhos alternativos de *bypass* aos nós subseqüentes, conforme a demonstrado na Figura 19a;
 - Suporta os seguintes mecanismos de proteção 1:1 e 1:n.
- End-to-End Path Protection (**EEPP**) service:
 - Provê proteção fim a fim para o caminho primário (*primary path*).
 - Suporta os seguintes mecanismos de proteção: 1+1, 1:1, e 1:n;
 - Conforme Figura 19b.
- **MP2MP** protection service:
 - Provê mecanismos de proteção para estruturas do tipo E-LAN (Seção 2.2.2.1).
- Link Protection based on Link Aggregation (**LPLA**):
 - Baseado na funcionalidade *Link Aggregation* especificada em [33].

Estes mecanismos podem ser associados para a criação de arranjos mais complexos.

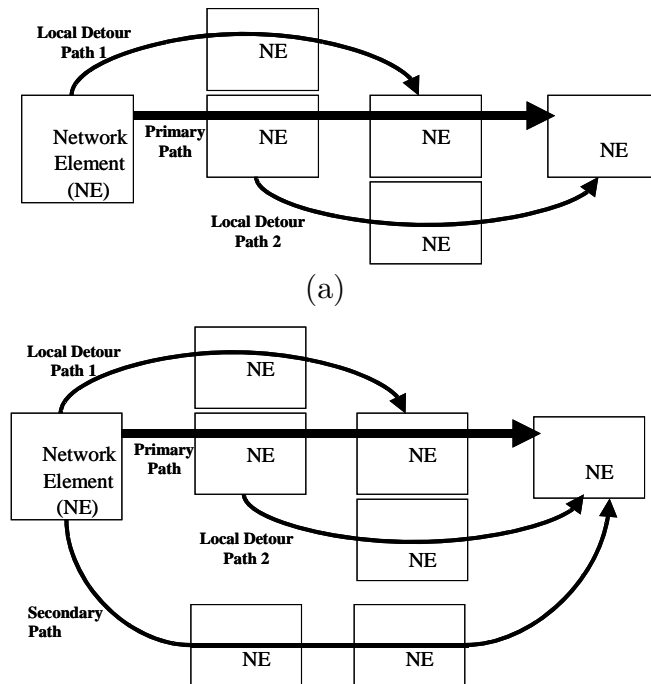


Figura 19. Mecanismos de proteção MEF2. (a) **ALNP** e (b) **EEPP**. [6]

2.2.4 Perspectivas futuras para a arquitetura:

Acredita-se que grande parte do sucesso da arquitetura ethernet advenha da, até então, centralização do seu desenvolvimento no IEEE. O fato é que nos últimos anos, à medida que a rede caminhou na direção da MAN/WAN, organismos como o MEF, IETF e a ITU-T, criaram grupos específicos para o desenvolvimento de padrões nesta área. Felizmente, até o momento, grande parte dos padrões disponibilizados tem claros traços de um trabalho conjunto entre os organismos. Todavia, o futuro do desenvolvimento da arquitetura, e por consequência a manutenção do seu sucesso, dependerá da continuidade deste trabalho em associação.

2.3 Sumário:

Apresentamos na primeira parte deste capítulo os elementos mais comumente encontrados em sistemas ópticos de transmissão, tais como: transmissores e receptores ópticos, regeneradores, amplificadores, acopladores, filtros, OXCs e WDM.

Discutimos suas características comuns e fizemos uma breve análise comparativa entre os tipos distintos existentes.

Na segunda parte deste mesmo capítulo apresentamos a arquitetura ethernet, suas extensões voltadas à operação *carrier* e discutimos os atributos padronizados pelo MEF para a proposta metroethernet. As características de cada um dos padrões vigentes e em especificação definidos pelo IEEE, ITU, MEF e IETF foram apresentadas e suas peculiaridades comentadas.

Capítulo 3: Light-trails – LT

Neste capítulo apresentamos a arquitetura Light-trail (LT), suas características, formas de operação e modalidades propostas para controle de acesso ao meio (MAC). Por fim, discutimos sua viabilidade como alternativa para o cenário das redes metropolitanas.

3.1 Introdução:

Os avanços observados nos sistemas de comunicação óptica nas últimas décadas elevaram a capacidade das redes atuais para a casa dos Tbps. Isto deveu-se em grande parte ao advento de tecnologias como a WDM, que possibilitaram multiplicar por dezenas de vezes o número de canais ópticos de comunicação em uma mesma fibra.

Todavia, sistemas como o WDM foram concebidos com base no paradigma das conexões ponto-a-ponto, cuja granularidade no atendimento às demandas é equivalente a todo um comprimento de onda. Entretanto, em um cenário como o atual em que as aplicações são fortemente baseadas no protocolo IP, com perfil de tráfego orientado a rajadas (*bursts*) e com grande flutuação ao longo do tempo, alocar um comprimento de onda para atender a uma única demanda torna-se um enorme desperdício de recursos.

Este aprovisionamento “estático”, com base na premissa de “um canal de comunicação por sessão demandada”, torna-se extremamente ineficiente. Isto ocorre, pois, ao alocar de forma exclusiva todo um caminho óptico (*Lightpath* - LP) - definido por um comprimento de onda - exclusivamente para um par transmissor-receptor, impossibilita seu compartilhamento e reuso. Esta situação redundante em redes com recursos indisponíveis, todavia com capacidade subutilizada.

Além disto, a aplicação das soluções WDM que se utilizem de OADMs e OXCs, realizando comutações totalmente ópticas, ainda são economicamente inviáveis para as redes MAN atuais.

Nesta conjuntura, tornam-se necessárias arquiteturas que se agreguem à infraestrutura WDM existente e que ainda:

- Possuam custo de implantação economicamente viável,
- Sejam capazes de realizar provisionamento dinâmico,
- Tenham foco nas demandas baseadas no perfil de tráfego IP,
- Possuam alta capacidade e suportem altas taxas,
- Sejam capazes de atender demandas variáveis, e
- Possuam alta granularidade.

Atualmente, algumas abordagens em redes de comunicações ópticas vislumbram endereçar estas necessidades [15]:

- Comutação óptica de rajadas (*optical burst switching*): Foi uma das primeiras propostas para se criar um esquema de comutação totalmente óptico. Propõe implementar esquema de comutação óptica no qual um pacote de controle precede os *burst* de dados, e é responsável por comandar a configuração dos comutadores para estabelecimento do caminho óptico fim-a-fim. Os circuitos ópticos permaneceriam ativos pelo intervalo de tempo necessário para atender às demandas baseadas em rajadas de tráfego. O *lightpath* existe então enquanto a rajada estiver sendo transmitida, sem que esta deixe o domínio óptico. Esta abordagem possibilita também que os pacotes possam ser “bufferizados” e agrupados (*grooming*) em rajadas mais longas, a fim de diminuir a quantidade de comutações ópticas necessárias.
- Comutação óptica de pacotes (*optical packet switching*): É a versão óptica equivalente da comutação realizada em quadros no domínio elétrico, onde o encaminhamento de um pacote é realizado com base na informação do seu cabeçalho. Propõe o estabelecimento dos circuitos ópticos para atendimento de demandas no nível de pacotes. Aumenta enormemente a eficiência visto que possibilita uma melhor utilização do meio. Todavia uma estrutura

“puramente óptica”, que seja capaz de analisar cabeçalho e *payload* de um pacote, sem conversão OEO, ainda levará tempo para tornar-se comercialmente viável, ou talvez nunca chegue a ser.

- *Grooming* de Tráfego: Esta é a técnica atualmente mais utilizada para permitir o uso mais eficiente dos recursos dos sistemas ópticos. Nesta proposta, demandas em subtaxas (*sub-lambda*) são agregadas no domínio elétrico para transmissão em um mesmo comprimento de onda, aumentando a taxa de utilização dos enlaces ópticos.

A questão é que alguns destes métodos requerem a existência de sistemas de comutação óptica dinamicamente reconfiguráveis e que sejam extremamente rápidos, ao ponto de estabelecer e destruir os caminhos ópticos necessários com a mesma dinâmica em que as demandas de tráfego surgem e terminam. Muito do que se discute neste sentido ainda encontra-se no campo da pesquisa e soluções comerciais economicamente viáveis ainda devem demorar algum tempo até que cheguem ao mercado.

A proposta da arquitetura Light-trail (LT) é endereçar a todas estas necessidades, possibilitando comutação no domínio óptico com alta granularidade, de forma simples e econômica.

Diferentemente das redes ópticas comumente encontradas nas redes atuais de transporte, que baseiam-se na disponibilização de conexões ponto-a-ponto, a arquitetura Light-trail (LT) tem por objetivo principal permitir que estas conexões possam ser compartilhadas, aumentando a utilização do meio e reduzindo a necessidade de comutações ópticas. Discutiremos suas características e funcionalidades nas seções seguintes.

3.2 A arquitetura e hardware LT:

O conceito de Light-trail, apresentado originalmente em [10], consiste em um conjunto arquitetura/protocolos, que combina componentes ópticos comercialmente disponíveis, capaz de estabelecer caminhos ópticos entre qualquer par de nós origem-destino na rede, ao mesmo tempo em que permite que nós intermediários comuniquem-se com os demais nesta mesma rota.

Isto se dá pelo estabelecimento de conexões ópticas unidirecionais em um mesmo comprimento de onda, entre pares de nós origem-destino definidos como *convener node* e *end node*, que passam a compor um *light-trail*. Este permite aos nós intermediários, de forma controlada, transmitir dados aos vizinhos no sentido *downstream* (fluxo origem-destino), sem a necessidade de conversões O-E-O, aumentando a taxa de utilização média do meio e reduzindo os custos de equipamentos. Além disso, esta proposta reduz o tempo de *setup* de conexões entre nós de um mesmo LT, visto que o estabelecimento do caminho óptico é eliminado neste caso, havendo apenas troca de sinalização para autorização de transmissão.

Seu objetivo é reduzir o número de conversões O-E-O, possibilitando a reconfiguração dinâmica da rede e minimizando a necessidade de comutações ópticas. Sua abordagem permite ofertar comunicação com alta granularidade, maximizando a utilização dos canais de comunicação, evitando conseqüentemente ociosidades, mas oferecendo ainda assim as vantagens das redes WDM no que tange à transparência a protocolos e taxas de transmissão.

Outra possibilidade interessante é a transmissão *multicast* óptico no segmento de rede definido pelo light-trail, uma vez que este bus óptico é compartilhado. Esta possibilidade, embora vá ao encontro das demandas atuais de vídeo *broadcasting* e vídeo sob demanda, traz problemas inerentes de segurança, a serem resolvidos nas camadas superiores.

A Figura 20 mostra um nó LT multi-lambda típico. Para cada comprimento de onda está presente uma Unidade de Acesso Light-trail (*Light-trail Access Unit* - LAU), que é composta dos seguintes elementos:

- *Splitter* (divisor): Acoplador passivo do tipo 1x2, responsável por dividir o sinal óptico originário de um nó no sentido *upstream* (UpNode), possibilitando a entrega de parte de sinal ao elemento de recepção do nó corrente, e repassando o sinal restante ao próximo nó no sentido *downstream* (DownNode).
- *Combiner* (combinador): Acoplador passivo do tipo 2x1, responsável por agregar o sinal óptico originário do elemento de transmissão do nó corrente ao sinal recebido de um UpNode, encaminhando o sinal resultante ao próximo DownNode.
- *Shutter* (chave óptica): Elemento da arquitetura responsável por comandar

a segmentação do comprimento de onda que compõe o LT. Funciona como uma chave óptica ON-OFF, ora permitindo, ora interrompendo a propagação deste sinal óptico, definindo desta forma o início e o fim do mesmo.

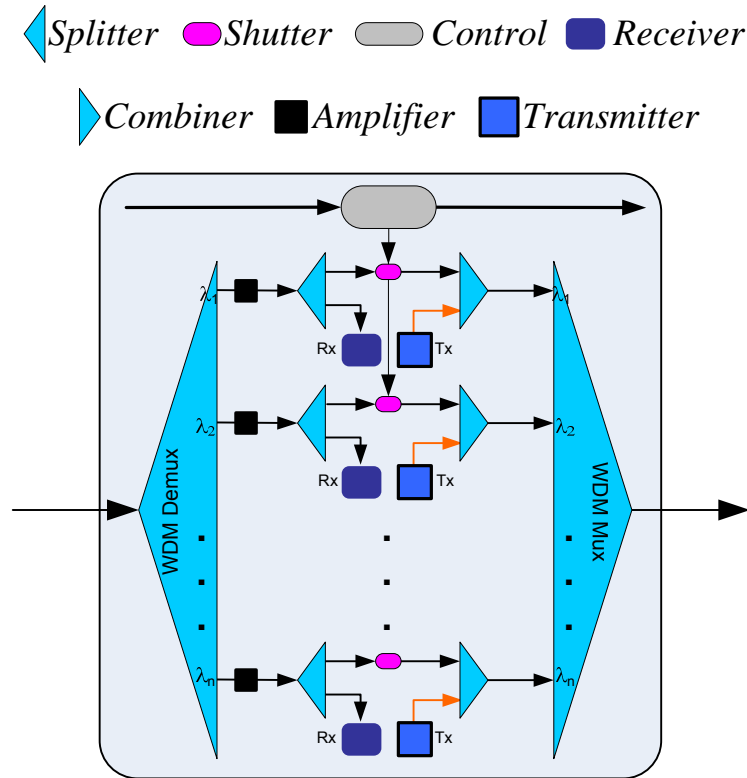


Figura 20. Nó LT

- Control (controle): Elemento da arquitetura responsável por administrar o *shutter*, a fim de que este possa segmentar de forma controlada o comprimento de onda desejado. É operado através do canal de controle (OSC).
- Receiver (receptor): Elemento da arquitetura responsável pela recepção óptica dos dados do nó, realizando a conversão opto-elétrica necessária.
- Transmitter (transmissor): Elemento da arquitetura responsável pela transmissão óptica dos dados do nó, realizando a conversão eletro-óptica necessária.
- Amplifier (amplificador): Elemento da arquitetura responsável por amplificar o sinal óptico proveniente da saída do *splitter* a fim de que seja encaminhado ao próximo DownNode.

3.2.1 Forma de operação:

Embora a arquitetura possibilite a utilização de WDM, consideraremos apenas o cenário de um único comprimento de onda em nossas análises. Nesta condição, um LT unidirecional de 4 nós tem tipicamente a estrutura mostrada na Figura 21.

O sinal óptico originário de um nó anterior (UpNode) segue pelo LT no sentido origem→destino propagando-se por todos os nós. Ao chegar ao *splitter* de um determinado nó, tendo sido previamente amplificado, parte suficiente deste sinal é capturada e entregue ao receptor deste nó, para que possa identificar se a informação é destinada a ele e decidir se descarta o pacote ou repassa para as camadas superiores.

O restante do sinal óptico segue adiante (funcionalidade *drop and continue*) para o *shutter*, operado via OSC na modalidade fora de banda (*out-of-band* – OOB), que decide por permitir ou bloquear sua passagem. O sinal que não é bloqueado pelo *shutter*, passa então pelo *combiner* antes de deixar o nó. É neste ponto que o protocolo MAC permitirá ou não ao nó inserir seus dados para transmissão.

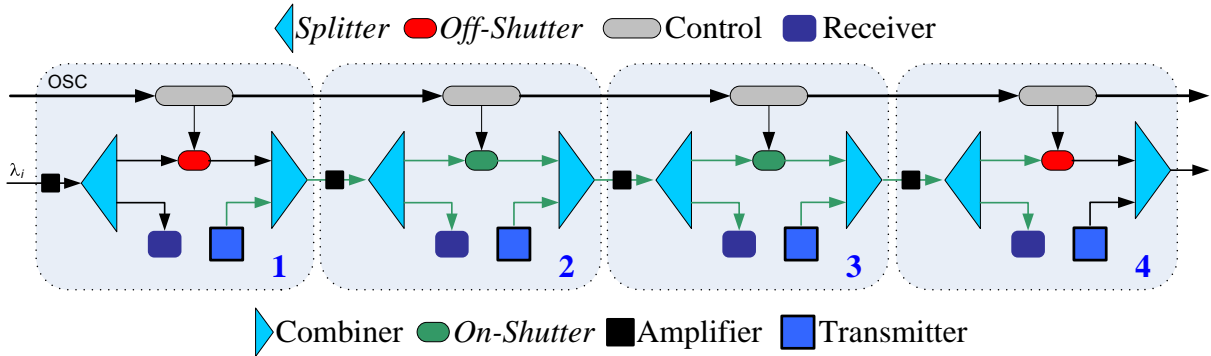


Figura 21. LT unidirecional

Nos nós que encabeçam o LT (o *convener node* – CN) e que o terminam (o *end node* – EN), o *shutter* estará sempre na posição OFF, isolando este comprimento de onda neste trecho da rede, permitindo seu reuso nos demais segmentos da rede óptica. Em todos os demais nós intermediários do LT o *shutter* estará na posição ON, permitindo a passagem do sinal.

O controle do estabelecimento e destruição dos LT ao longo do tempo, bem como a troca de sinalização entre os elementos da rede, é realizado através de um canal óptico de supervisão e controle (OSC), que opera fora de banda. Este canal permeia a rede óptica, estando presente em todos os seus nós e sendo necessariamente

processado eletricamente em cada um deles. É no OSC que também trafegam as informações sobre a disponibilidade de recursos e tabelas de LTs existentes e seus membros. Todas estas informações permitem ao plano de controle definir quando estabelecer novos LT, quando destruí-los, encurtá-los ou alongá-los a fim de atender às demandas.

É importante lembrar que os *shutters* não são reconfigurados dinamicamente a cada pacote ou *burst*, pois os LTs são criados para existirem por longos períodos. Com esta abordagem, minimizamos a necessidade de comutações ópticas sucessivas decorrentes das solicitações de estabelecimento de conexões entre pares origem→destino, reduzindo os tempos de reconfiguração e conseqüentemente a latência decorrente dos tempos requeridos para o provisionamento dos serviços. O light-trail poderá existir enquanto houver necessidade de comunicação entre quaisquer dos nós que dele fazem parte, podendo também ser “alongado” ou “encurtado” sem a necessidade de reconfiguração de qualquer natureza dos nós intermediários. Também será reduzido o tempo de estabelecimento de conexões entre nós que já fazem parte de um determinado light-trail visto que a etapa de estabelecimento do caminho óptico é eliminada neste caso, havendo apenas troca de sinalização.

3.2.2 Controle de acesso ao meio:

Face a sua natureza de operação baseada no compartilhamento do meio óptico, é importante que a arquitetura contemple também uma modalidade de controle de acesso ao meio (MAC), que arbitre a alocação de recursos.

Atualmente encontram-se propostos alguns métodos de controle de acesso ao meio para a arquitetura LT [10][13][16], que serão comentados nas seções seguintes.

3.2.2.1 LT-MAC:

É um protocolo simples baseado no CSMA e que opera da seguinte forma: o nó que deseja transmitir escuta o meio a fim de localizar qualquer transmissão em curso originada em um UpNode. Caso detecte o canal livre, transmite um sinal de balizamento (*beacon*). Desta forma ele notifica aos nós *downstream* que uma transmissão será iniciada. Caso tenha detectado o canal ocupado, o nó aguarda até que este esteja livre e envia sinal *beacon*, sinalizando o início de transmissão.

Após um tempo pré-definido (*guard band*) de envio do *beacon*, o nó inicia então a transmissão dos seus dados. Enquanto transmite, o nó continua monitorando o meio à procura de um sinal *beacon* de um UpNode, o que sinalizaria o início da transmissão de um outro nó. Percebendo um *beacon*, interrompe sua transmissão (quebrando o pacote) e permite que o sinal *upstream* passe. O quadro cuja transmissão foi interrompida é descartado pela estação destino ao ter sua integridade verificada.

Vale observar que nesta abordagem os nós superiores (UpStream) têm sempre prioridade, o que pode ocasionar o fenômeno conhecido como *starvation*¹⁴ dos nós *downstream*.

3.2.2.2 LT-BUS MAC:

Nesta proposta, em cada nó é adicionado um *loop* óptico, a fim de inserir um atraso proposital no sinal que chega do nó *upstream*. Este atraso é configurado para ter exatamente o tempo necessário para acomodar integralmente o MTU definido para o protocolo em uso.

Antes de transmitir, o nó verifica a presença de algum sinal (ou *beacon*) do loop de atraso. Se a linha de atraso estiver livre, ele transmite seus dados. Caso esteja ocupada, aguarda até que esteja livre.

Se durante transmissão é detectada presença de sinal na entrada do *loop* de atraso, o nó termina a transmissão do pacote corrente e libera o meio para o sinal que chega. Nesta abordagem, visto a presença da linha de atraso, o nó intermediário não necessita abortar o envio do pacote em curso, tampouco o receptor precisa se preocupar com a análise de pacotes inválidos.

Um ponto negativo desta solução é que o *loop* insere atraso de propagação e perdas em cada nó pelo qual o sinal viaja, podendo possuir grandes dimensões físicas.

3.2.2.3 LT FAIR ACCESS MAC:

Esta abordagem objetiva eliminar o *starvation* e introduz idéia do máximo atraso de acesso esperado.

¹⁴ Situação em que o nó não consegue autorização para acesso ao meio

Seu funcionamento baseia-se em um esquema *round-robin* com intervalos de transmissão (*slots*) pré-alocados, tornando a alocação “justa”. Esta alocação é baseada na negociação de tempos aceitáveis alocados para cada nó.

O ciclo se inicia com o CN enviando um *beacon* a fim de interromper qualquer transmissão em curso e sinalizar o início de uma nova rodada. O nó então transmite seus dados até que sua janela de tempo venha a se extinguir ou que tenha transmitido todos os pacotes em seu *buffer*.

Em muitos casos o intervalo alocado ao nó será maior que o necessário para enviar todos os pacotes em seu *buffer*. Neste caso, o tempo não utilizado será “passado adiante”, permitindo aos nós seguintes a utilização deste tempo extra.

Análises funcionais e comparativas destas modalidades podem ser encontradas em [13] e [16].

3.3 LT em redes metropolitanas:

Do ponto de vista da topologia física, a arquitetura LT permite a implementação sob a forma de barramento, anel ou mesmo em malha [11][17][18]. Esta flexibilidade vai ao encontro das especificações feitas pelo MEF, conforme discutido na seção 2.2.2, visto que os três tipos de serviços definidos por ele (E-LINE, E-LAN e E-TREE) podem ser perfeitamente implementados sobre a tecnologia LT diretamente na camada física.

Além disso, face à flexibilidade exibida pela arquitetura, esta se mostra perfeitamente adequada às necessidades dos novos serviços de tempo real baseados no protocolo IP [11]. Uma vez permitindo o compartilhamento dos caminhos previamente estabelecidos entre os nós que deles fazem parte, esta assegura a flexibilidade demandada pelos serviços baseados em IP, possibilitando a comunicação em alta velocidade, com baixa latência, com a granularidade adequada a qualquer taxa de tráfego, resultando em baixa ociosidade do canal.

Uma arquitetura que provê conexões fisicamente transparentes entre elementos de comutação IP, contribui em muito para a redução das latências e suas incertezas (*jitter*) oriundas das filas dos *switches*. Por outro lado, a influência de problemas da camada física, que possam afetar a taxa de perda de quadros, torna-se fator importante a ser considerado nos sistemas ópticos transparentes como o LT. As

funcionalidades de OAM podem ser uma ferramenta importante no monitoramento da performance dos sistemas metro ethernet que incorporam LTs.

3.4 Sumário:

Neste capítulo discutimos que os avanços nos sistemas de comunicações ópticas, fortemente influenciados por tecnologias com WDM, elevaram à casa dos Tbps a capacidade dos sistemas ópticos. Entretanto os sistemas WDM não possuem perfeita adequação às demandas atuais, fortemente baseadas em IP, visto que foram concebidos para um cenário ponto-a-ponto, com alocação estática e com granularidade equivalente a todo um comprimento de onda. Isto se traduz em ociosidade e ineficiência na alocação de recursos.

A proposta LT surge como uma alternativa capaz de endereçar as necessidades de baixo custo, rápido provisionamento, foco em tráfego IP, alta capacidade e alta granularidade.

Esta arquitetura, proposta em [10], e que combina elementos ópticos comerciais, tem como principal apelo a possibilidade do compartilhamento dos caminhos ópticos estabelecidos, entre um par qualquer de nós origem destino, com os nós intermediários pelos quais eles passam. Conexões unidirecionais em um mesmo comprimento de onda são então definidas, permitindo aos nós intermediários, de forma controlada, transmitir aos vizinhos (no sentido *downstream*) sem necessidade de conversões O-E-O.

Sua utilização em redes metropolitanas pode assumir quaisquer das configurações físicas comumente encontradas, como barra, anel ou malha, flexibilidade esta aderente às especificações MEF para redes metro. Esta flexibilidade mostra-se também perfeitamente adequada às demandas das redes baseadas em protocolo IP, pois aliam comunicação em alta velocidade, baixa latência e tempo de *setup*, alta granularidade, resultando em baixa ociosidade do canal.

Capítulo 4: Operation, Administration and Maintenance – OAM

Neste capítulo introduzimos o conceito de OAM para as redes ethernet, bem como os elementos que compõem a arquitetura (Seção 4.3). Apresentamos em seguida, na Seção 4.4, a normatização vigente, incluindo-se as funcionalidades especificadas e os formatos e funções das PDUs atualmente definidas.

4.1 Introdução:

Uma das funcionalidades básicas e mais importantes de um serviço *carrier class* é o suporte à Operação, Administração e Manutenção (*Operation, Administration and Maintenance*), ou simplesmente OAM. Estas funções estavam presentes, até então, apenas em tecnologias maduras como SDH/SONET e ATM, que possuem nativamente recursos de monitoramento de conectividade (continuidade), detecção de falhas, testes de *loopback*, geração de alarmes e monitoramento/gerenciamento de performance.

Diversas iniciativas nos últimos anos objetivaram disponibilizar funcionalidades OAM em plataformas ethernet, visto esta ter se movido para além das fronteiras das LANs. As seções seguintes descrevem as características e especificações vigentes, relacionadas a funcionalidades OAM para a plataforma ethernet (Eth-OAM).

4.2 Visão geral do Ethernet OAM (Eth-OAM):

As empresas, usuárias da arquitetura ethernet na modalidade LAN, vinham gerenciando suas redes basicamente com o uso de protocolos baseados no IP, como o

SNMP [43] e no ICMP¹⁵. Todavia as corporações comumente não necessitam gerenciar milhares de serviços para diferentes clientes. Por outro lado, as operadoras de serviços (*carriers*) normalmente operam com milhares de clientes e conectam-se a outras prestadoras de serviços, o que envolve a necessidade de um trabalho conjunto a fim de oferecer serviços fim-a-fim confiáveis.

O recente movimento da arquitetura ethernet na direção da WAN, impulsionado tanto pelos fabricantes quanto operadoras, ao buscarem sempre soluções de alta capacidade aliadas a baixo custo, fez necessário o desenvolvimento de padrões que permitissem a implementação de um *framework* OAM para a arquitetura.

Em princípio, um *framework* OAM deve prover suporte ao gerenciamento nas áreas de falhas, configuração, *accounting*, performance e segurança. Representados pelo acrônimo “FCAPS”. São estes os 5 pilares nos quais o OAM se fixa.

Já em relação às funcionalidades necessárias, estas estão classificadas nas seguintes áreas [4]:

- Deteção de falhas: na eventualidade de uma falha, a funcionalidade OAM deve detectá-la e notificar ao sistema de supervisão;
- Localização/isolamento de falhas: detectada uma falha, o sistema deve identificar sua localização rapidamente;
- Notificação de defeitos: uma vez que o defeito foi detectado, este deve ser reportado ao sistema de supervisão e demais elementos de rede;
- Proteção: no caso de haver interrupção de serviço, decorrente de falha, esta funcionalidade deve ser capaz de comutar os circuitos envolvidos na falha para os caminhos de proteção (ver Seção 2.2.3.5);
- Monitoramento de performance: A fim de garantir os quesitos discriminados no SLA, faz-se necessário monitorar a qualidade do serviço provido, através de métricas como taxa de erro de bit (BER), perda de pacotes, atraso (*delay*) e variação do atraso (*jitter*).

Muito já foi feito em relação ao Eth-OAM. Todavia as funcionalidades atuais ainda estão evoluindo para suportar algumas demandas *carrier class*, em termos de:

¹⁵ Utilizado pelas ferramentas *ping* e *traceroute*

- Detecção e notificação de falhas em redes multiponto;
- Localização precisa do ponto de falha;
- Aceleração da recuperação de falha.

Embora toda padronização voltada arquitetura ethernet normalmente advenha do IEEE, outros organismos como ITU-T e o MEF, vêm definindo, em trabalhos aparentemente conjuntos até o momento, uma série de padrões no sentido de prover a arquitetura Ethernet de funcionalidades OAM semelhantes às dos sistemas “legados”. Apresentaremos a seguir, na Seção 4.3, os elementos que compõem a arquitetura e na Seção 4.4 as características e funcionalidades dos padrões Eth-OAM atualmente vigentes.

4.3 Elementos da arquitetura:

Independente do organismo normatizador, ressalvadas as peculiaridades de nomenclatura adotadas por cada órgão, a arquitetura utilizada nos padrões atualmente propostos é basicamente a mesma.

Considerando que redes ethernet normalmente envolvem múltiplos domínios de administração, o IEEE, ITU-T e MEF adotaram um modelo único, baseado em um cenário multi-domínio, que obedece a uma arquitetura básica comum. A Figura 22 seguir detalha os elementos desta arquitetura.

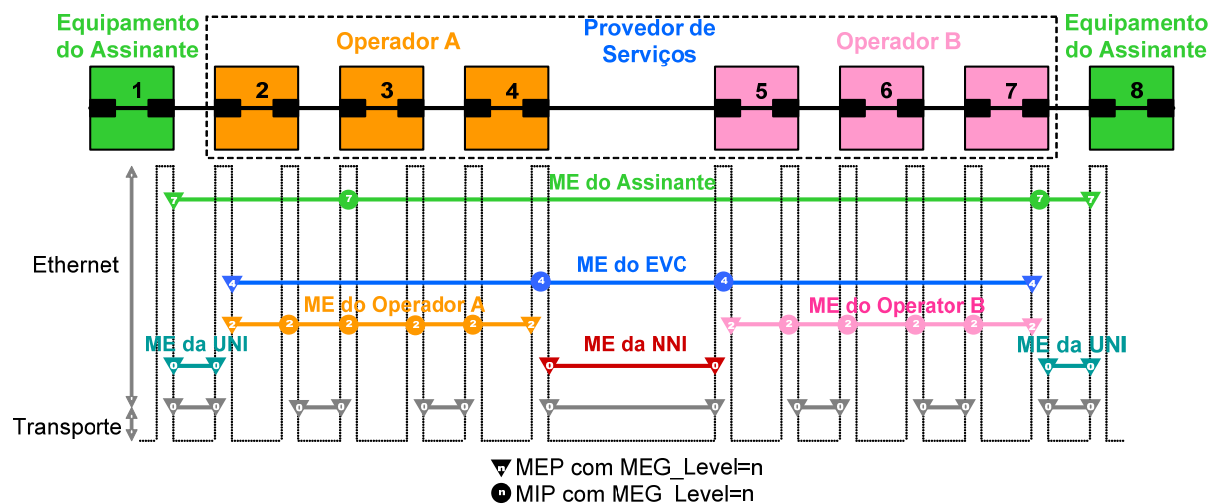


Figura 22. Modelo OAM [9]

O primeiro ponto a ser considerado é que o Eth-OAM baseia-se em um modelo funcional hierárquico composto de “domínios de gerência” (*maintenance domains*). Neste modelo, a rede se serviços OAM é segmentada em três domínios: cliente (*customer*), provedor (*provider*) e operador (*operator*) (Figura 22).

Um domínio de gerência é uma rede ou subrede, na camada ethernet, dentro do qual mensagens OAM podem ser trocadas. Cada domínio é normalmente associado a uma fronteira de administração, a qual determina sua área de atuação.

Nas próximas seções descreveremos os elementos que compõem o framework Eth-OAM. Para fins de comparação entre os padrões vigentes, no título de cada seção foi indicada a denominação utilizada pelo ITU-T [37] e pelo IEEE [31], para cada tipo de entidade, respectivamente.

4.3.1 Maintenance Entity (ME)^{16,17}:

É definido como uma entidade, ou objeto, que demanda gerenciamento e no qual as funções OAM são aplicadas. Uma ME pode ser definido ao longo de vários pontos da rede, entre dois MEPs de MEs distintos ou mesmo fim-a-fim permeando várias MEs, sendo terminado sempre por um MEP (Seção 4.3.3). As MEs também podem ser aninhadas, desde que não haja sobreposição entre elas. Uma ME pode também conter vários MIPs (Seção 4.3.4). A Figura 22 ilustra esta definição e mostra a relação entre estes elementos da arquitetura.

4.3.2 Maintenance Entity Group (MEG)¹⁶/ Maintenance Association (MA)¹⁷:

Um MEG é definido como um grupo de ME's que satisfaça aos seguintes critérios [37]:

- Exista no mesmo domínio de administração,
- Tenha o mesmo MEG LEVEL (ver Seção 4.3.5),
- Pertença a uma mesma S-VLAN [30],
- Pertença ao mesmo E-LINE (Seção 2.2.2.1) em conexões ponto a ponto, ou à mesma E-LAN/E-TREE (Seção 2.2.2.1) em conexões multiponto.

¹⁶ Denominação conforme ITU Y.1731 [37]

¹⁷ Denominação conforme IEEE 802.1ag [31]

Em conexões ponto-a-ponto (ver Seção 2.2.2) um MEG contém apenas um ME. Já nas multiponto com N elementos, um MEG contém $n*(n-1)/2$ MEs.

4.3.3 MEG End Point¹⁶ / MA End Point¹⁷ (MEP):

O MEP é a entidade que delimita o começo e o fim de uma ME. É dele a missão de originar e terminar mensagens OAM de/para a ME o qual ele termina/representa.

4.3.4 MEG Intermediate Point¹⁶ / MA Intermediate Point¹⁷ (MIP):

Um MIP é definido como o elemento localizado em um ponto intermediário de um ME, pelo qual quadros OAM passam. Funciona como um ponto de monitoragem, cabendo a ele apenas reagir ou responder à mensagens OAM, não lhe sendo permitido originá-las.

4.3.5 MEG Level¹⁶ / MA (MD) Level¹⁷:

Como foi comentado, os MEGs podem ser aninhados. Neste caso, as mensagens OAM destinadas a um determinado MEG devem ser perfeitamente distinguíveis das mensagens destinadas aos outros dentro de um mesmo grupo de aninhamento. O MEG Level tem a função de permitir esta distinção.

Estão padronizados oito MEG Levels, a fim de poder comportar diferentes cenários. Para os clientes (*customers*), estão alocados os MEG Levels **5** à **7**. Para os provedores (*providers*) os de número **3** e **4**. Já para os operadores (*operators*) os MEG Levels de **0** à **2**. Para a UNI e NNI o MEG Level será sempre **0**.

4.4 Padrões Eth-OAM:

Vários dos organismos mundiais responsáveis por normatizações relacionadas a telecomunicações vêm, nos últimos anos, se empenhando no lançamento de uma série de padrões relacionados à Eth-OAM. Nas próximas seções descreveremos alguns dos padrões mais importantes acerca do tema.

4.4.1 IEEE 802.1ag: Connectivity Fault Management

O Padrão IEEE 802.1ag, também conhecido com *Connectivity Fault Management*, ou simplesmente CFM, é uma extensão (*amendment*) ao padrão 802.1Q – 2005 [28], que especifica funcionalidades básicas de OAM.

Comparado ao ITU Y.1731 (Seção 4.4.2), o CFM pode ser visto como uma versão restrita e limitada deste, atuando basicamente na detecção de falhas e implementando basicamente funções para detecção, verificação e isolamento de falhas. Estas funções estão mapeadas nos seguintes protocolos:

- Detecção de Falhas (*Fault Detection*): *Continuity Check Protocol* (Seção 4.4.1.2).
- Verificação e isolamento de falhas (*Fault Verification and Isolation*): *Loopback Protocol*. Normalmente acionado depois de detectada uma falha (Seção 4.4.1.3).
- Descoberta de Topologia (*Path Discovery*): *Linktrace protocol* (Seção 4.4.1.4).

Algumas funções, embora não definidas no escopo da especificação, são executadas por protocolos já existentes oriundos de outros padrões:

- Recuperação de falhas (*Fault Recovery*): *Spanning Tree Protocol* [27];
- Notificação de Falhas (*Fault Notification*): SNMP [43].

4.4.1.1 Formato das mensagens CFM:

As mensagens CFM são transportadas no campo de dados de quadros ethernet padrão (Figura 23), utilizando-se, para tal, de um ethertype definido especificamente para esta aplicação.

6 bytes	6 bytes	2 bytes	Dados (variável)	4 bytes
DA	SA	Etype	PDU CFM	FCS

Figura 23. Transporte de PDU CFM em quadro ethernet

Onde:

- **DA:** É o endereço de destino do quadro CCM, podendo ser um endereço *unicast* ou *multicast*, conforme o tipo de mensagem enviada.
- **SA:** É o endereço do MEP que enviou o quadro.

- **Etype:** Indica o ethertype do quadro OAM, cujo valor padrão é “0x8902”.
- **Dados:** Carrega o conteúdo da PDU CFM.
- **FCS:** Campo com o CRC32 do quadro.

A PDU CFM, por sua vez, é composta de 5 campos básicos, que formam um cabeçalho comum a todas as mensagens CFM (Figura 24):

- **MEL:** Campo de 3 bits do primeiro byte da mensagem. Identifica a qual **MEG Level** o quadro está associado;
- **Version:** Campo de 5 bits do primeiro byte da mensagem. É o número da versão do protocolo. Atualmente fixado em “0”.
- **OpCode:** Campo de 1 byte que identifica o tipo de mensagem carregada pelo quadro.
 - Pode assumir os valores da Tabela 4.

Descrição	OpCode
Reservado para o IEEE 802.1	0
Continuity Check Message (CCM)	1
Loopback Reply (LBR)	2
Loopback Message (LBM)	3
Linktrace Reply (LTR)	4
Linktrace Message (LTM)	5
Reservado para o IEEE 802.1	6-31
Definidos pelo ITU-T Y.1731	32-63
Reservados para o IEEE 802.1	64-255

Tabela 4. OpCodes CFM

- **Flags:** Campo de 1 byte que assume valores que variam conforme o **OpCode** selecionado.
- **TLV Offset:** Campo de 1 byte que aponta para o **End TLV** ou para o próximo campo TLV¹⁸ transportado pelo quadro.
- **End TLV:** Campo de 1 byte que delimita o fim do quadro. Valor padrão “0”.

¹⁸ No caso de múltiplos TLVs

A Figura 24 a seguir exhibe o formato geral de um quadro CFM:

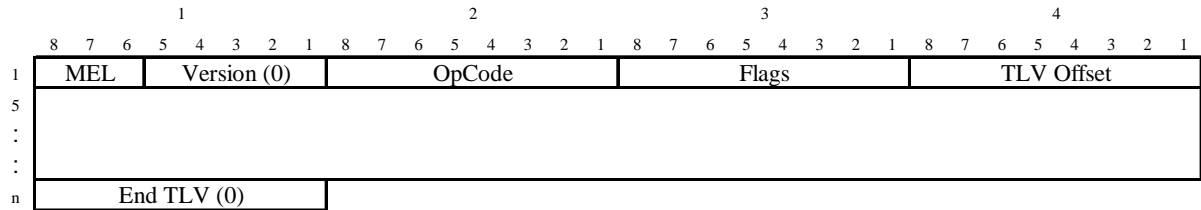


Figura 24. Formato Geral Quadro IEEE CFM

4.4.1.2 Continuity Check Protocol – CC:

O CC é o protocolo especificado no CFM que tem por função verificar a integridade da rede, por meio do envio de mensagens periódicas unidirecionais denominadas *Continuity Check Messages* – CCM.

Conforme especificado no padrão, todo MEP tem a missão de enviar quadros CCM periodicamente¹⁹ para endereços *multicast* padronizados. Todos os demais MEPs que pertençam ao mesmo domínio (mesmo **MEG Level**) receberão estas mensagens. Cabe então a cada MEP receptor monitorar a chegada de quadros CCM, a fim de detectar falhas na rede.

As seguintes falhas podem ser detectadas pela mensagem CCM:

- Se nenhum quadro CCM for recebido em um intervalo de tempo igual a 3,5 vezes o intervalo definido por **CCM Interval**, uma falha de continuidade na rede é detectada.
- Se uma mensagem CCM é recebida, mas o campo **MEG Level** tem valor menor que o do MEP que o recebeu, o erro “*Unexpected MEG Level*” é detectado.
- Se a mensagem CCM recebida tem o mesmo **MEG Level** do MEP que o recebeu, mas um **MEG ID** diferente, o erro “*Mismerge*” é detectado.
- Se a mensagem CCM recebida tem o mesmo **MEG Level** e o mesmo **MEG ID** do MEP que o recebeu, mas um **MEP ID** diferente, o erro “*Unexpected MEP*” é detectado.
- Se a mensagem CCM recebida tem o mesmo **MEG Level**, o mesmo **MEG ID** e o mesmo **MEP ID** do MEP que o recebeu, mas um período (*period*)

¹⁹ Cláusula 7.1.1 de [37].

diferente, o erro “*Unexpected Period*” é detectado.

4.4.1.2.1 PDU CCM:

A PDU CCM é formada pelo cabeçalho comum CFM (Seção 4.4.1.1) seguido dos campos específicos da mensagem. Na CCM, o cabeçalho comum assume os valores a seguir, mantendo-se os demais campos em seu formato geral:

- **OpCode: 0x01** (CCM)
- **Flags:** Formado pelos campos indicados na Figura 25.

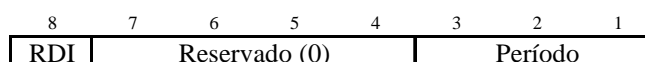


Figura 25. Campo Flags do quadro CCM

Onde:

- RDI: Sinaliza *Remote Defect Indication*.
- Reservado: campo reservado para extensões futuras.
- Período: Transporta o campo **CCM Interval**, que pode assumir os valores mostrados no Tabela 5.

CCM_Interval	Período	Descrição	Função
0	Valor inválido	Valor não assumível por PDUs CCM	Valor não assumível por PDUs CCM
1	3.33 ms	300 frames por segundo	Valor padrão para aplicações de proteção (redundância).
10	10 ms	100 frames por segundo	
11	100 ms	10 frames por segundo	Valor padrão para aplicações de monitoramento de performance.
100	1 s	1 frame por segundo	Valor padrão para gerenciamento de falhas.
101	10 s	6 frames por minuto	
110	1 min	1 frame por minuto	
111	10 min	6 frames por hora	
Embora existam 7 valores possíveis, é recomendado o uso dos valores padrão.			

Tabela 5. Valores assumidos pelo período

- **TLV Offset:** Preenchido com valor “70”.

Na seqüência, inserem-se os demais campos específicos do quadro CCM:

- **Sequence Number:** Campo de 4 bytes preenchido por “0” ou com conteúdo da variável **CCIsentCCMs**²⁰. Tem por função identificar um número de seqüência para a mensagem.

²⁰ Ver seção 20.10.2 de [31]

- **MEP ID:** Especifica de qual MEP a mensagem foi enviada. Assume valores de **1** a **8191**. Os 3 bits mais significativos (MSB) são sempre definidos como “0”.
- **MEG ID:** Este campo tem um tamanho total de 48 bytes e é formado por 6 outros subcampos, a saber:
 - *Maintenance Domain Name Format*: Campo de 1 byte que indica do formato selecionado para o nome do domínio (*Domain Name*), podendo assumir os valores do Tabela 6.

Descrição	Valor
Reservado para o IEEE 802.1	0
Nenhum "Maintenance Domain Name" presente	1
String baseada no "Domain Name" (formato DNS)	2
MAC address + Inteiro de 2 bytes	3
String de caracteres	4
Reservado para o IEEE 802.1	5-31
Definidos pelo ITU-T Y.1731	32-63
Reservado para o IEEE 802.1	64-255

Tabela 6. Campo *Maintenance Domain Name Format*

- *Maintenance Domain Name Length*: Campo de 1 byte que indica o tamanho do campo “*Maintenance Domain Name*”. Pode assumir valores de **1** a **43**.
- *Maintenance Domain Name*: Campo de tamanho variável²¹, preenchido com o “*Domain Name*” desejado, conforme tipo especificado em “*Maintenance Domain Name Format*”.
- *Short MA Name Format*: Campo de 1 byte que indica o formato “*short*” para o nome do domínio (*domain name*), assumindo os valores listados no Tabela 7.
- *Short MA Name Length*: Campo de 1 byte que indica o tamanho do campo “*Short MA Name*”. Pode assumir qualquer valor respeitados os limites de tamanho total do campo “MEG ID”.
- *Short MA Name*: Campo de tamanho variável, preenchido com o “*Short Name*” conforme tipo especificado em “*Short MA Name Format*”.

²¹ Definido por pelo valor do campo *Maintenance Domain Name Length*

- *Padding*: Se necessário para completar os 48 bytes, com valor padrão “0”.

Descrição	Valor
Reservado para o IEEE 802.1	0
VID primário	1
String de caracteres	2
Inteiro de 2 bytes	3
VPN_ID baseada na RFC 2685	4
Reservado para o IEEE 802.1	5-31
Definidos pelo ITU-T Y.1731	32-63
Reservado para o IEEE 802.1	64-255

Tabela 7. Campo Short MA *Name Format*

- **Definido pelo ITU-T:** Campo com 16 bytes com conteúdo de responsabilidade do ITU-T em sua recomendação [37]; (ver Seção 4.4.2)
- **END TLV:** Campo de 1 byte que sinaliza o fim do quadro CCM. Preenchido com valor “0”.

A Figura 26 exhibe a estrutura geral do quadro CFM/CCM.

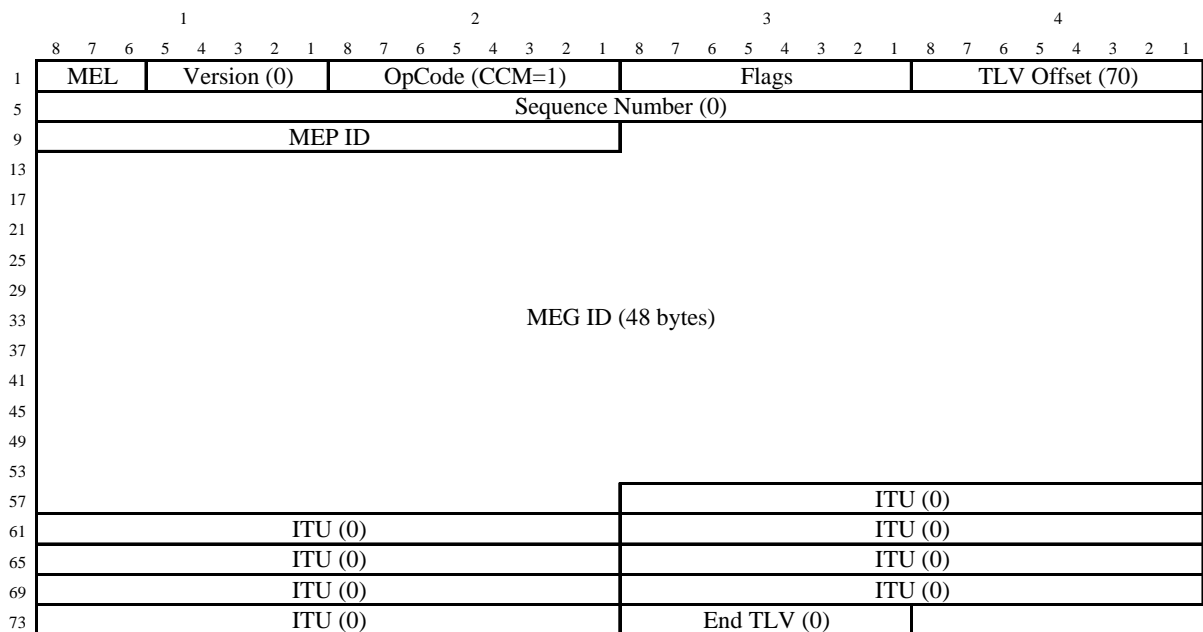


Figura 26. Formato do quadro CCM/IEEE

4.4.1.3 Loopback Protocol – LB:

O LB é utilizado, sob demanda, com a função de verificar conectividade entre MEPs ou entre um MEP e um MIP, sob a forma de mensagens *unicast* ou *multicast* denominadas *Loopback Messages* – LBM.

As mensagens tipo *unicast* são destinadas à verificação e isolamento de falhas na rede, permitindo aos MEPs avaliar a conectividade bidirecional entre si, bem como com os MIPs. Esta verificação, inclusive, permite checagem da vazão do enlace, taxas de erro, etc. Uma vez recebida a mensagem pelo seu destinatário, este gera uma mensagem de resposta, denominada *Loopback Reply* – LBR, que será uma cópia da mensagem recebida, excetuando-se a comutação dos endereços de destino e origem no cabeçalho, e a substituição do **OpCode** pelo **0x02** (LBR), conforme **Tabela 4**.

Já no caso das mensagens *multicast*, uma LBM é encaminhada a todos os elementos de uma mesmo **MEG Level**. Os nós destino, após recebimento da mensagem LBM, aguardam um intervalo de tempo aleatório²² antes de enviar a resposta (LBR) na modalidade *unicast*. Importante ressaltar que os MIPs são “transparentes” ao LBM *multicast*, não reagindo a eles.

4.4.1.3.1 PDU LBM:

Assim como as demais PDUs da especificação CFM, a PDU LBM é formada pelo cabeçalho comum CFM (conforme Seção 4.4.1.1), seguido dos campos específicos desta mensagem. Na LBM, o cabeçalho comum assume os valores a seguir, mantendo-se os demais campos em seu formado geral:

- **OpCode:** 0x03 (LBM)
- **Flags:** assume valor padrão “0”.
- **TLV Offset:** Preenchido com valor “4”.

Na sequência, inserem-se os demais campos específicos do quadro LBM:

- **Transaction ID/Sequence Number:** Campo de 4 bytes que contem o conteúdo da variável **nextLBMtransID**²³, que é um número de sequência da mensagem.
- **TLVs opcionais:** se for o caso, ou
- **END TLV:** Campo de 1 byte que sinaliza o fim do quadro LBM. Preenchido com valor “0”.

²² Entre “0” e “1”s a fim de evitar excesso de tráfego no nó.

²³ Ver Seção 20.28.2 da especificação IEEE 802.1ag [31]

A Figura 27 exibe a estrutura geral do quadro LBM/CCM.

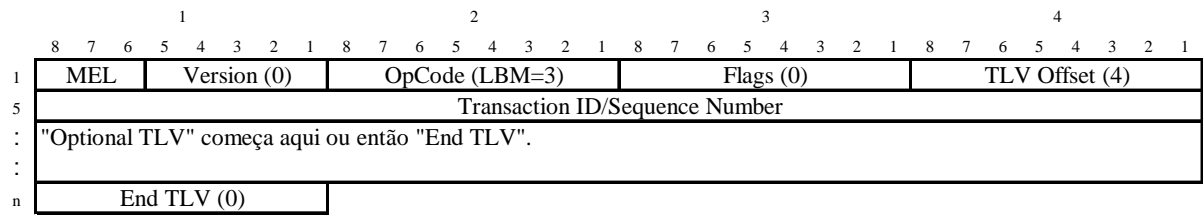


Figura 27. PDU LBM

4.4.1.4 Linktrace Protocol – LT:

O LT é uma função CFM utilizada sob demanda, que tem por objetivo permitir a descoberta de caminhos ou vizinhança (*path discovery*) e isolamento/localização de falhas (*fault isolation*), sob a forma de mensagens *multicast* denominadas *Linktrace Message* – LTM

As mensagens *multicast* são originadas em um MEP, sempre sob demanda, e carregam o endereço MAC da estação que se deseja alcançar: outro MEP de um mesmo domínio. Depois de transmitida a mensagem, o MEP remetente aguarda, durante um intervalo de tempo de 5s²⁴, pelas respostas daqueles que a receberam.

Os MIPs existentes entre o MEP demandante e o MEP destino, ao recebem a LTM, responderão ao demandante seguindo a seguinte regra:

- Primeiramente, identificam no cabeçalho da mensagem o endereço ao qual responderão com uma mensagem LTR, bem como o endereço do MEP destino da mensagem LTR (**TargetMAC**).
- Se este MIP conhece o endereço do MEP apontado por TargetMAC e se este endereço está associado a apenas uma porta de saída (que não seja a mesma porta pela qual a LTM chegou), o MIP envia mensagem LTR em resposta ao nó demandante, após aguardar um tempo aleatório²⁵. A mensagem então é repassada adiante, pela porta de saída associada ao **TargetMAC**, decrementando o campo TTL²⁶.

²⁴ Conforme Seção 20.3.1 da especificação IEEE 802.1ag [31]

²⁵ Entre “0” e “1”s. Tem por objetivo não sobrecarregar o demandante.

²⁶ Se maior que “1”.

Já o MEP destino ao receber uma mensagem LTR endereçada a ele, responde ao demandante com uma mensagem LTR. Um MEP nunca repassa uma LTM adiante.

4.4.1.4.1 PDU LTM:

A PDU LTM, conforme a especificação CFM, é formada pelo cabeçalho comum CFM (Seção 4.4.1.1) seguido dos campos específicos desta mensagem. Na LTM o cabeçalho comum assume os valores a seguir, mantendo-se os demais campos em seu formado geral:

- **OpCode:** 0x05 (LTM)
- **Flags:** Formada pelos campos indicados na Figura 28.

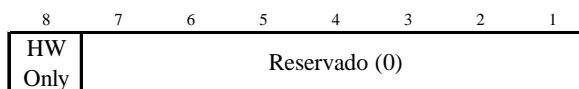


Figura 28. Flags PDU LTM

Onde:

- HW Only: indica que apenas endereços MAC aprendidos via tabelas de encaminhamento ativas devem ser usadas para reencaminhar (*relay*) mensagens para próximo nó.
- **TLV Offset:** Preenchido com valor “17”.

Na seqüência, inserem-se os demais campos específicos do quadro LTM:

- **Transaction ID:** Campo de 4 bytes que contem a *transaction ID* da mensagem.
- **TTL:** Campo de 1 byte que contém o *Time to Live* (TTL) da mensagem.
- **OriginMAC Address:** Campo de 6 bytes que contém o endereço MAC do MEP origem.
- **TargetMAC Address:** Campo de 6 bytes que contém o endereço MAC do MEP destino.
- **TLVs opcionais:** se for o caso, ou
- **END TLV:** Campo de 1 byte que sinaliza o fim do quadro LTM. Preenchido com valor “0”.

A Figura 29 exibe a estrutura geral do quadro LTM/CCM.

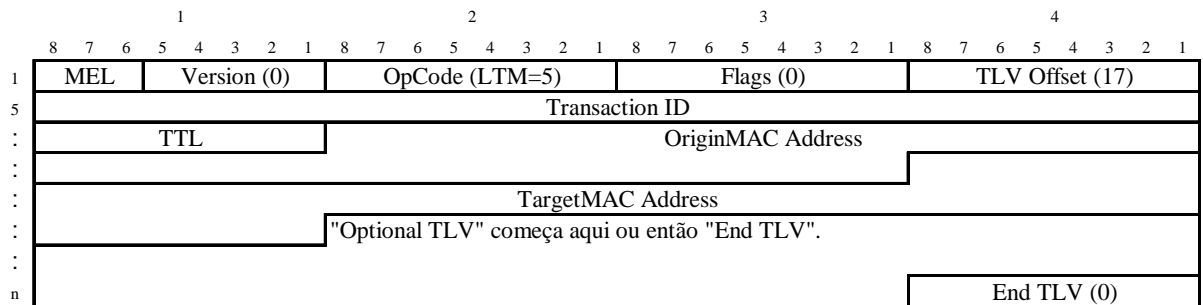


Figura 29. PDU LTM

Mais detalhes da especificação IEEE 802.1ag poderão ser encontrados em [31].

4.4.2 ITU-T Y.1731: OAM Functions and Mechanisms for Ethernet Based Networks

Em linhas gerais, podemos afirmar que a especificação IEEE 802.1ag – CFM é um “*subset*” da recomendação ITU-T Y.1731, denominada *OAM Functions and Mechanisms for Ethernet based networks*, visto que esta última abrange um escopo muito mais amplo de funcionalidades OAM.

Dentre as diferenças entre os padrões, podemos citar a lista de **OpCodes**, que no caso do ITU-T é mais ampla, adicionando aos constantes da Seção 4.4.1.1, os listados na Tabela 8.

Descrição	OpCode
Alarm Indication Signal (AIS)	33
Remote Defect Indication (LCK)	35
Test Signal (TST)	37
Automatic Protection Switching (APS)	39
Maintenance Communication Channel (MCC)	41
Loss Measurement (LMM)	43
Loss Measurement Reply (LMR)	42
Delay Measurement Oneway (IDM)	45
Delay Measurement Twoway (DMM)	47
Delay Measurement Reply (DMR)	46
Experimental OAM (EXM) - fora do escopo da recomendação	49
Experimental OAM Reply (EXR) - fora do escopo da recomendação	48
Vendor Specific OAM (VSM) - fora do escopo da recomendação	51
Vendor Specific OAM Reply (VSR) - fora do escopo da recomendação	50
Reservados para uso futuro do ITU-T	32, 34, 36, 38, 44, 52-63

Tabela 8. OpCodes OAM adicionais do ITU-T

A recomendação do ITU-T dividiu as funções OAM em dois grandes grupos: Gerenciamento de Falhas e Monitoramento de Performance.

No primeiro grupo encontram-se as funções que possibilitam a detecção, verificação, localização e notificação de condições de defeito. Estas funções estão divididas da seguinte forma:

- **Ethernet Continuity Check (ETH-CC):** Tem o mesmo objetivo da CFM/CCM (ver Seção 4.4.1.2). Em relação à sua implementação (especificada nas cláusulas 7.1 e 9.2 em [37]), a diferença entre elas basicamente situa-se nos últimos 16 bytes do quadro CCM. Diferentemente da especificação IEEE, em que estes bytes não têm função alguma, na recomendação ITU-T estes são responsáveis por transportar as seguintes informações (Figura 30):
 - TxFCf: Campo de 4 bytes que carrega o contador de quadros CCM enviados por este MEP. Definido com “0” se não utilizado.
 - RxFCb: Campo de 4 bytes que carrega o contador de quadros CCM recebidos por este MEP. Definido com “0” se não utilizado.
 - TxFCb: Campos de 4 bytes que carrega o valor de TxFCf do último quadro recebido pelo MEP. Definido com “0” se não utilizado.

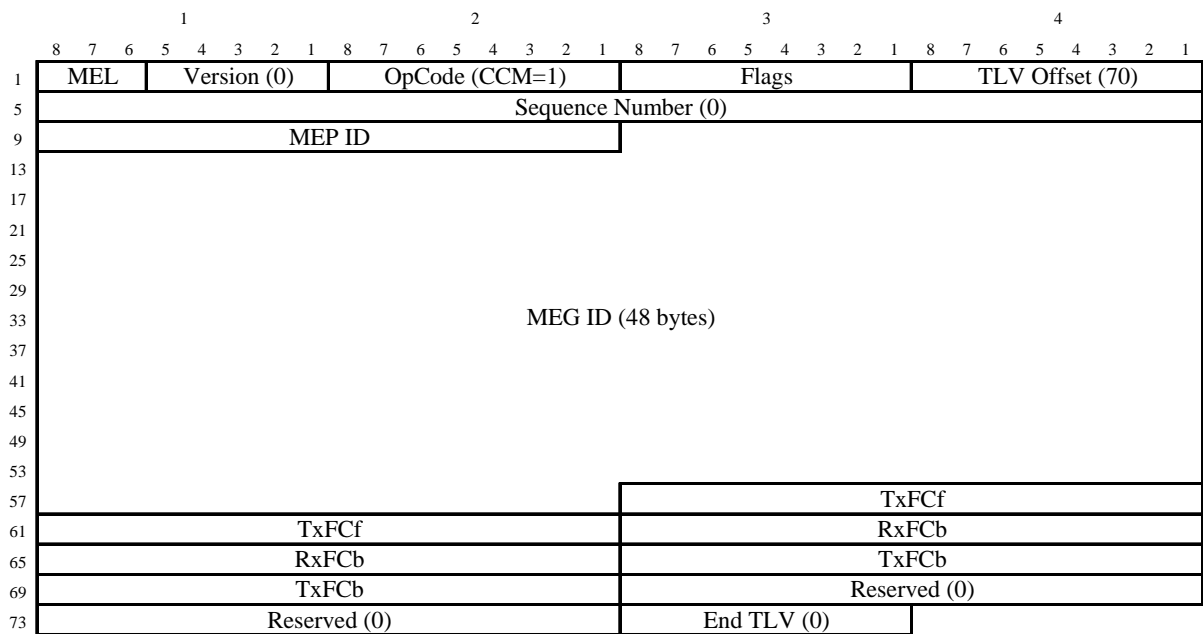


Figura 30. PDU CCM/ITU-T

- **Ethernet *Loopback* (ETH-LB):** Tem a mesma função e formatação da CFM/LBM (ver Seção 4.4.1.3). Seu funcionamento e PDU estão especificados nas cláusulas 7.2, 9.3 e 9.4 em [37].
- **Ethernet *Link Trace* (ETH-LT):** Também assume a mesma função e formatação da CFM/LTM (ver Seção 4.4.1.4). Seu funcionamento e PDU estão especificados nas cláusulas 7.3, 9.5 e 9.6 em [37].
- **Ethernet *Alarm Indication Signal* (ETH-AIS):** Utilizada para fins de supressão de alarmes em condições de defeito. Em condições de falha em um nó com grande concentração de tráfego, em que uma porção considerável da rede foi afetada, diversos MEPs vão sinalizar defeitos. A supressão de alarmes é necessária, neste caso, a fim de que alarmes secundários sejam suprimidos e apenas a causa principal se destaque. Seu funcionamento e PDU estão especificados nas cláusulas 7.4 e 9.7 em [37].
- **Ethernet *Remote Defect Indication* (ETH-RDI):** Esta mensagem tem por função comunicar aos demais MEPs, no sentido upstream uma condição de defeito identificada²⁷ no sentido *dowstream*. Está disponível apenas quando a função ETH-CC está ativa, pois utiliza o campo FLAGS desta mensagem. Seu funcionamento e PDU estão especificados na cláusula 7.5 em [37].
- **Ethernet *Locked Signal* (ETH-LCK):** Utilizado para notificar um bloqueio administrativo intencional. Permite ao MEP que recebe os quadros ETH-LCK diferenciar esta situação de uma condição de falha. Seu funcionamento e PDU estão especificados nas cláusulas 7.6 e 9.8 em [37].
- **Ethernet *Test Signal* (ETH-Test):** Mensagem enviada sob demanda, podendo ser aplicada “*in-service*” ou “*out-of-service*”²⁸, e que permite a realização de testes de diagnóstico. Pode ser utilizada para vários fins, dentre eles: medida de vazão, perda de quadros, taxas de erros de bit ou quadros fora de sequência. Os padrões de dados utilizados nos testes podem ser definidos como uma sequência pseudo-aleatória ou definidos pelo

²⁷ Via mensagem ETH-AIS

²⁸ Enviando em conjunto a mensagem ETH-LCK

usuário. Seu funcionamento e PDU estão especificados nas cláusulas 7.7 e 9.9 em [37].

- **Ethernet *Automatic Protection Switching* (ETH-APS):** É utilizada para controlar a comutação de circuitos de proteção. Sua PDU está especificada na cláusula 9.10 em [37] e a especificação do modo de operação encontra-se baseada em [36].
- **Ethernet *Maintenance Communication Channel* (ETH-MCC):** Esta mensagem provê um canal de comunicação, para fins de manutenção remota, entre MEPs. Sua PDU está especificada na cláusula 9.10 em [37]. A forma específica de utilização desta mensagem está fora do escopo da recomendação [37].
- **Ethernet *Experimental OAM* (ETH-EXP):** Utilizada para aplicações experimentais temporárias. Sua PDU está especificada nas cláusulas 9.17 e 9.18 em [37].
- **Ethernet *Vendor Specific OAM* (ETH-VSP):** Permite aos fabricantes criar funcionalidades OAM proprietárias, não exigindo interoperabilidade entre fabricantes diferentes. Sua PDU está especificada nas cláusulas 9.19 e 9.20 em [37]. Todavia o detalhamento da forma de operação da ETH-VSP está fora do escopo da recomendação [37].

Já no segundo grupo, o de Monitoramento de Performance, concentram-se as funções que permitem a medição de diferentes parâmetros aplicáveis a conexões ethernet ponto-a-ponto, tais como: taxa de perda de quadros (*frame loss ratio*), atraso de quadro (*frame delay*), variação no atraso do quadro (*frame delay variation*) e vazão (*throughput*).

Estas funções estão divididas da seguinte forma:

- ***Frame Loss Measurement* (ETH-LM):** Utilizada para coletar os valores dos contadores de quadros enviados e recebidos presentes nos MEPs. Seu funcionamento e PDU estão especificados nas cláusulas 8.1, 9.12 e 9.13 em [37].
- ***Frame Delay Measurement* (ETH-DM):** É uma função, utilizada sob demanda, para medição do “*frame delay*” e do “*frame delay variation*”. Seu

funcionamento e PDU estão especificados nas cláusulas 8.2, 9.14, 9.15 e 9.16 em [37].

- ***Throughput measurement:*** Na medição de vazão (*throughput*), é utilizado o método especificado na RFC 2544 [43]. As mensagens ETH-LB e ETH-Test podem ser utilizadas para esta função.

4.4.3 MEF17:

Ao contrário das demais normas relacionadas à OAM, que tiveram foco na especificação funcional de protocolos que implementassem funcionalidades OAM requeridas por redes *carrier ethernet*, a especificação MEF17 [9], denominada *Service OAM Requirements & Framework-Phase 1*, abordou o OAM da perspectiva de “serviços” para o usuário final nas redes MAN.

Teve por objetivo prover requisitos a serem satisfeitos pelos mecanismos OAM, bem como define um *framework* para discutir e implementar estes mecanismos. Detalhes da especificação poderão ser encontrados em [9].

4.5 Sumário:

Uma das funcionalidades básicas e mais importantes de um serviço *carrier class* é o suporte à Operação, Administração e Manutenção (OAM). Embora esta função estivesse presente apenas em tecnologias como SDH/SONET e ATM, diversas iniciativas nos últimos anos objetivaram disponibilizar funcionalidades OAM em plataformas ethernet.

Sistemas OAM devem possuir minimamente funcionalidades capazes de detectar, localizar e isolar falhas, notificar defeitos, implementar proteção e monitorar performance.

Apresentamos também a normatização atual estabelecida pelo IEEE e ITU, analisando suas semelhanças e diferenças. Com base neste estudo, fundamentamos nossa proposta de utilização do OAM para integração com as particularidades dos sistemas LT. Uma vez que o LT constitui uma camada física reconfigurável, o teste de continuidade (CCM) mostra-se como primeiro passo para a realização desta tarefa.

Capítulo 5: Implementação da Funcionalidade OAM

Neste capítulo introduzimos nossa proposta de configuração, com base na qual serão realizadas todas as nossas implementações. Nas seções 5.2 e 5.3 apresentaremos com detalhes as plataformas de *hardware* e *software* especificadas para desenvolvimento do trabalho.

5.1 Introdução:

A fim de possibilitar a implementação e avaliação da funcionalidade OAM sob uma rede LT, faz-se necessário, inicialmente, definir uma plataforma para realização das implementações e testes. Uma rede LT básica com 4 nós e um único comprimento

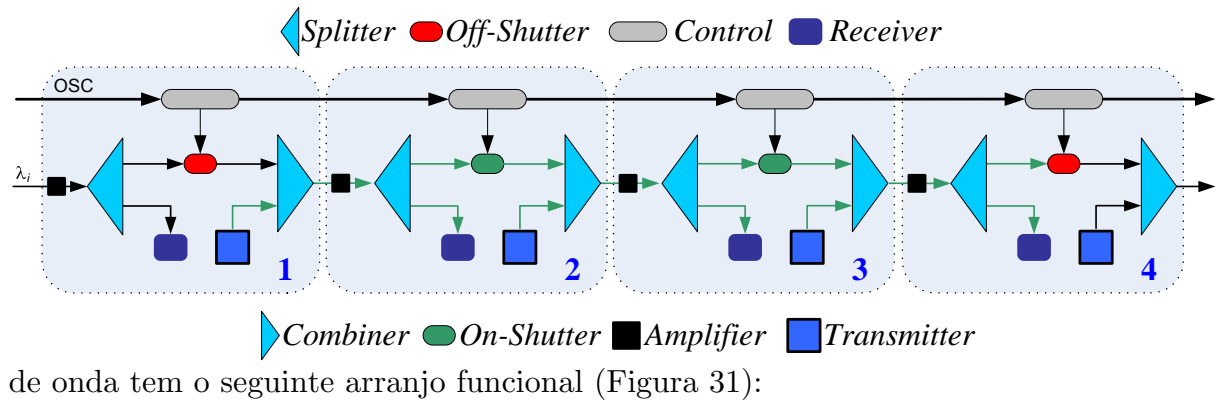


Figura 31. Rede LT básica de 4 nós

Conforme comentado no Capítulo 3, na proposta LT o tráfego de supervisão e controle (S&C) opera *out-of-band*, sob canalização diversa daquela pelos quais circulam os demais dados da rede. Isto redundando em um ambiente com redes distintas para cada uma destas naturezas de tráfego.

Neste sentido, nosso protótipo utilizou-se de duas redes diferentes, sendo uma para o tráfego de dados comuns entre as estações da rede LT e outra com função exclusiva de transportar informações de S&C.

A rede LT de dados foi construída sob a forma de um segmento óptico, tendo como base dois conversores de mídia PadTec/MCGE. Estes dispositivos, dotados de módulos GBICs *long-haul* operando a 1550nm, são os responsáveis por implementar os elementos que, conjuntamente com as estações de rede, fazem as vezes de nós LT. A rede de S&C, por sua vez, foi simulada através de uma rede ethernet padrão, operando sobre meio metálico a 10 Mbps.

Às estações de rede presentes nos nós LT cabia a missão de originar, receber e analisar, simultaneamente, as informações de S&C e os dados propriamente ditos. Para que pudéssemos ter então as duas redes operando distinta e simultaneamente, as estações de rede foram equipadas com dois adaptadores ethernet cada: um ligado à rede óptica LT e outro à rede metálica de S&C.

Outro componente importante da rede LT é o *shutter*, elemento este com o objetivo de segmentar controladamente os comprimentos de onda ao longo da rede. Em nosso ambiente, esta função foi desempenhada por um protótipo composto de um filtro FP mecanicamente sintonizável, acionado por um motor de passo microcontrolado. Este microcontrolador, baseado em um PIC (*Peripheral Integrated Controller*) (ver Seções 5.2.4 e 5.3.4) é provido de uma interface ethernet, o que permite sua comunicação via rede com o sistema de S&C.

Para que o sistema de S&C pudesse então atuar sobre este filtro, condição básica para efetuar a segmentação controlada do LT, foi implementado um módulo de software embarcado neste microcontrolador. Este módulo, mediante o recebimento via rede de requisições oriundas do sistema de S&C, é capaz de atuar sobre o conjunto motor-filtro, posicionando-o com precisão.

Com base nestas características descritas, e objetivando implementar um ambiente LT que minimamente nos permitisse realizar a validação do modelo proposto, bem como a avaliação dos resultados obtidos, definimos como nossa plataforma o *setup* descrito na Figura 32.

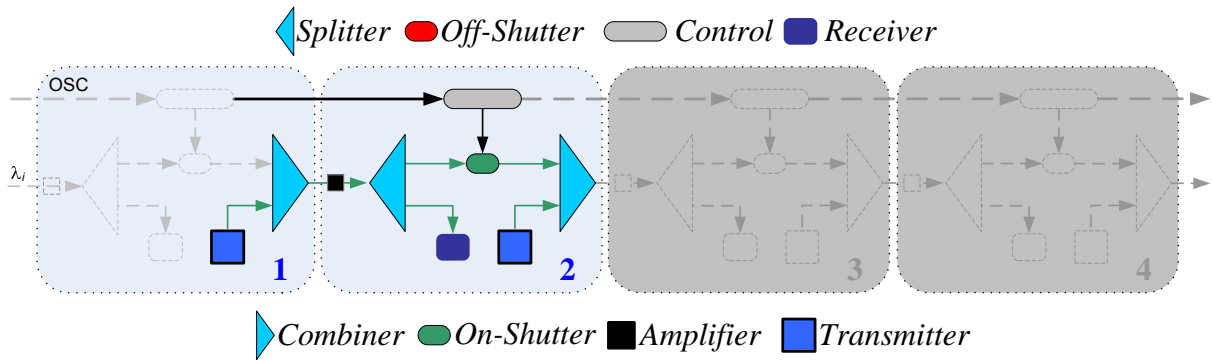


Figura 32. Setup do ambiente de implementação

Diversos foram os elementos aplicados na execução do trabalho, a fim de que se pudesse construir o arranjo necessário para realização dos testes. Nas seções 5.2 e 5.3 deste capítulo, descreveremos os elementos desta configuração, identificando suas características, funções, aplicações e forma de utilização.

5.2 Plataformas de Hardware:

Nas subseções que seguem, apresentamos os elementos de *hardware* que foram aplicados neste trabalho.

5.2.1 Estações de rede:

Duas estações de rede, tipo PC, foram utilizadas no trabalho. Estas desempenhavam a função de nós transmissores e receptores, tanto para a rede de dados LT quanto para o canal de S&C, sob a forma de mensagens OAM.

Estas estações possuíam as seguintes características:

- Marca/Modelo: Dell/Optiplex GX 270
- Processador: P4 2.8Ghz
- RAM: 512Mb

À estação transmissora couberam as seguintes missões:

- Montagem dos quadros OAM a serem enviados coletando automaticamente os dados necessários para a formação e envio do mesmo.
- Envio dos quadros OAM à estação receptora.
- Geração de estatísticas de diagnóstico de envio.

Já a estação receptora desempenhava as seguintes tarefas:

- Recepção dos quadros OAM enviados pela estação transmissora.
- Verificação da integridade do quadro OAM recebido.
- Geração das estatísticas de diagnóstico.

5.2.2 Adaptadores de Rede Ethernet:

Cada uma das estações de rede dispunha de dois adaptadores ethernet cada. O primeiro deles, um Intel E1000 1 Gbps *onboard*, com capacidade de até 1Gbps em par metálico e suportando *gigabit jumbo frames* de até 16 KB, tinha a missão de realizar a comunicação no âmbito da rede de dados LT. O segundo adaptador, um Realtek RTL-8169 1 Gbps PCI, com capacidade de até 1 Gbps em par metálico e suportando *gigabit jumbo frames* de até 7,2 KB, realiza a comunicação com a rede de supervisão e controle.

No ambiente Linux em que os adaptadores estavam instalados, as interfaces do sistema operacional foram padronizadas como “eth0” para o adaptador Intel e “eth1” para o Realtek.

5.2.3 Transmissores/Receptores Ópticos:

Em redes LT, alguns elementos têm por função realizar as conversões eletro-ópticas necessárias à comunicação com os demais membros do LT. No presente trabalho, estes elementos foram implementados por intermédio de dois conversores de mídia gigabit, com as seguintes características:

- Marca/Modelo: Padtec/MCGE14FS
- Portas: 02 Gigabit , sendo uma óptica (GBIC) e outra metálica (RJ-45)

Características do GBIC:

- GBIC: LASER tipo DFB operando em 1550nm.
- Potência óptica: min -4 dBm e max 0 dBm.
- Sensibilidade nominal do Receptor: -26 dBm.
- Largura espectral transmissor: 1,0 nm.

5.2.4 Microcontrolador PIC:

Para que fosse possível controlar, remotamente, o acionamento do filtro óptico mecânico²⁹ através de mensagens de rede, fez-se necessária a utilização de um dispositivo microcontrolado que dispusesse de capacidade de comunicação ethernet.

Dentre as opções disponíveis, optamos pelo dispositivo fabricado pela empresa 2EI³⁰, que possui as seguintes características:

- Fabricante/Modelo: 2EI / PME10.
- Microcontrolador Microchip® PIC18F8722 (128kb FLASH, 3936b RAM).
- Controlador Ethernet Realtek RTL8019AS com velocidade de 10Mbps.
- Conector para RS232 (MAX232) e ICSP.
- Pilha TCPIP nativa da Microchip®. Disponível em código aberto.
- Alimentação 5V.
- Dois conectores de 28 pinos que disponibilizam externamente a maioria das portas do PIC.

A Figura 33 mostra as características físicas deste dispositivo.

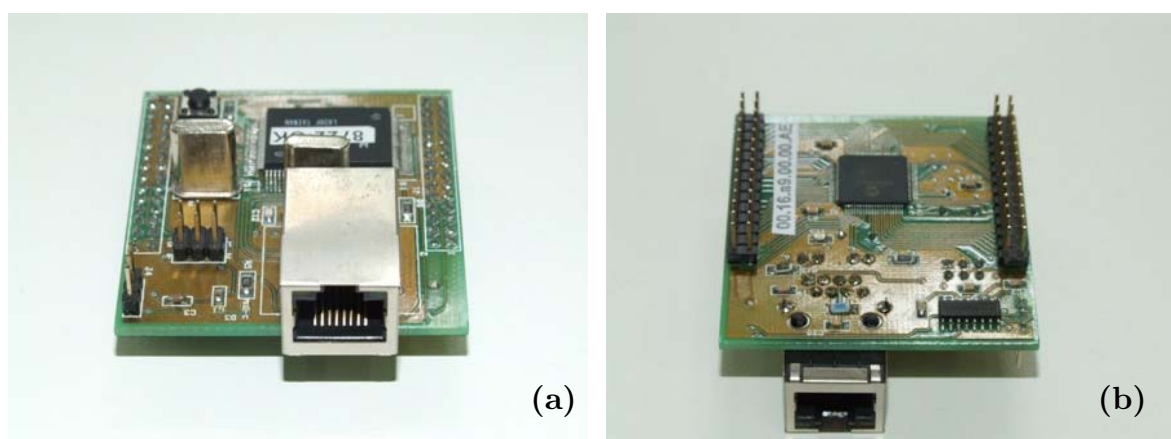


Figura 33. Vista superior (a) e inferior (b) da placa microcontroladora

Por intermédio de uma de suas portas de saída, que estava ligada a um circuito com a função de *driver*, este microcontrolador aciona um motor de passo (MP) interligado ao filtro opto-mecânico. Para interconexão física do motor de passo

²⁹ Ver seção 5.2.5

³⁰ www.2ei.com.br

ao filtro óptico, foi necessária também a construção de um sistema de engrenagens. Este arranjo pode ser observado na Figura 34.

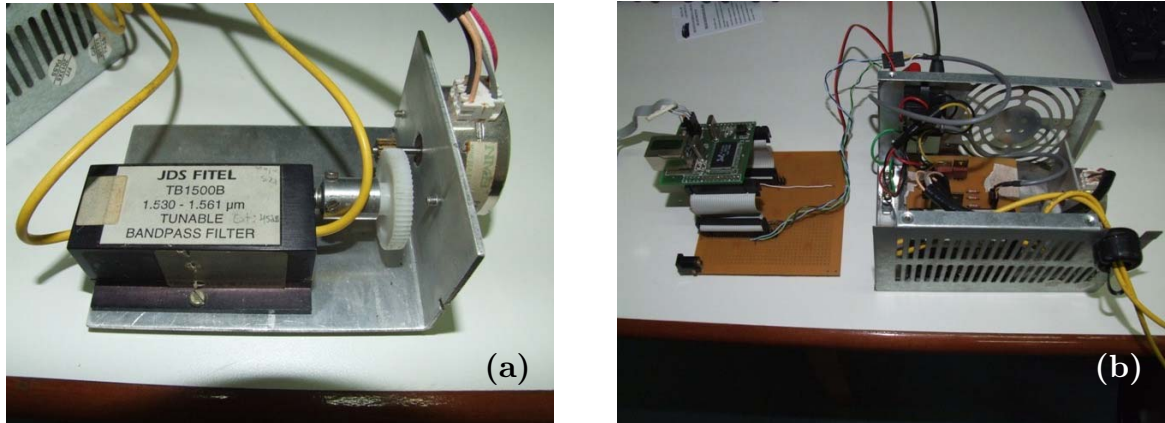


Figura 34. (a) Acoplamento Filtro x MP (b) PIC x MP x Filtro

O software desenvolvido permite então que, através da troca de mensagens via rede e conforme a necessidade, o filtro seja sintonizado com precisão. A seção 5.3.4 dá detalhes sobre este software.

5.2.5 Filtros:

Nas redes LT, os filtros ópticos assumem a função dos *shutters*³¹, sendo estes responsáveis por segmentar, de forma controlada, a rede óptica LT.

Em nosso trabalho utilizamos um filtro tipo opto-mecânico, ao qual foi adaptado um sistema de acionamento realizado por um motor de passo microcontrolado³².

As características deste filtro são as seguintes:

- Filtro mecânico Marca/Modelo: JDS FITEL/TB1500B (Figura 35)
 - Tipo: Fabry-perot
 - Faixa selecionável: 1530 à 1561 μm
 - Largura espectral: 1,4 nm

³¹ Ver Seção 3.2

³² Ver Seção 5.2.4



Figura 35. Filtro Óptico

5.3 Plataformas de Software:

Nas subseções que seguem, apresentamos os elementos de *software* que foram aplicados e desenvolvidos neste trabalho.

5.3.1 Plataforma de desenvolvimento e testes:

Grande parte do escopo do trabalho concentra-se em uma plataforma de software, baseada nos seguintes elementos:

- Sistema operacional das estações de rede: Baseado em kernel Linux na versão 2.6.24.
- O ambiente de desenvolvimento: O desenvolvimento das funcionalidades OAM foi realizado sob plataforma Linux na distribuição Ubuntu, utilizando *raw sockets* em linguagem ANSI C. Já a codificação dos elementos de software embarcados no microcontrolador foi realizada em ambiente MPLAB 8.0 sob plataforma Microsoft Windows.
- Linguagem de desenvolvimento: As funcionalidades OAM, executadas nas estações de rede tipo PC, foram implementadas sob linguagem ANSI C, em ambiente Linux, utilizando o compilador gcc versão 4.2.4 e biblioteca glibc versão 2.7.10-ubuntu4. Já os elementos de software embarcados no microcontrolador foram desenvolvidos em linguagem C, em ambiente Microchip MPLAB 8.00 rodando em Microsoft Windows e utilizando a pilha TCP/IP padrão da Microchip®. O compilador C utilizado foi o MPLAB C32 v3.4.4, em conjunto com suas bibliotecas nativas.

- Ferramentas de testes:
 - Wireshark³³: Ferramenta tipo *sniffer* open source (GNU), com interface gráfica, utilizada para “*debug*” das mensagens que trafegam na rede. Utilizada em sua versão Linux.
 - Tcpdump: Ferramenta tipo *sniffer* nativa do Linux, com interface caracter.

5.3.2 Plano de controle LT:

Uma vez que não era objetivo deste trabalho desenvolver um plano de controle em seu sentido amplo, algumas funcionalidades foram minimamente implementadas como prova de princípio.

Neste trabalho nos ativemos a basicamente duas destas funcionalidades: controle do *shutter* (Seções 5.2.4 e 5.3.4) e mensagem OAM de teste de continuidade, avaliação de estado e teste de desempenho (Seção 5.3.3).

5.3.3 OAM:

Conforme os padrões vigentes [9][31][37], diversas funções OAM estão especificadas para as redes ethernet. No presente trabalho, nos ativemos à implementação da funcionalidade de teste de continuidade, implementada através da mensagem *Continuity Check* – CCM (Seção 4.4.1.2). Em nossa análise optamos pela adoção da nomenclatura utilizada pelo ITU-T para os campos das mensagens OAM, quando referenciados.

O módulo de transmissão **CCM-TX**, responsável pelo envio desta mensagem, implementado em linguagem C, é executado na estação de rede transmissora. Através da rede de dados LT, as mensagens são então geradas e enviadas para a estação de rede receptora. Esta por sua vez decodifica as informações, avaliando condições de erro previstas e gerando automaticamente as estatísticas pertinentes.

Muito embora nosso escopo esteja restrito à CCM, todas as estruturas de dados e funções, tanto do módulo transmissor quanto do receptor, estão definidas de forma a facilitar a implementação dos demais tipos de mensagens previstos nas

³³ Disponível em <http://www.wireshark.org/>

normas vigentes. Com este intuito, para cada tabela ou campo previsto nas normas, está definida uma `struct`, `enum` ou `array` correspondente.

Conforme mencionado anteriormente (Seção 4.4.1.2), a PDU CCM tem o formato exibido na Figura 36.

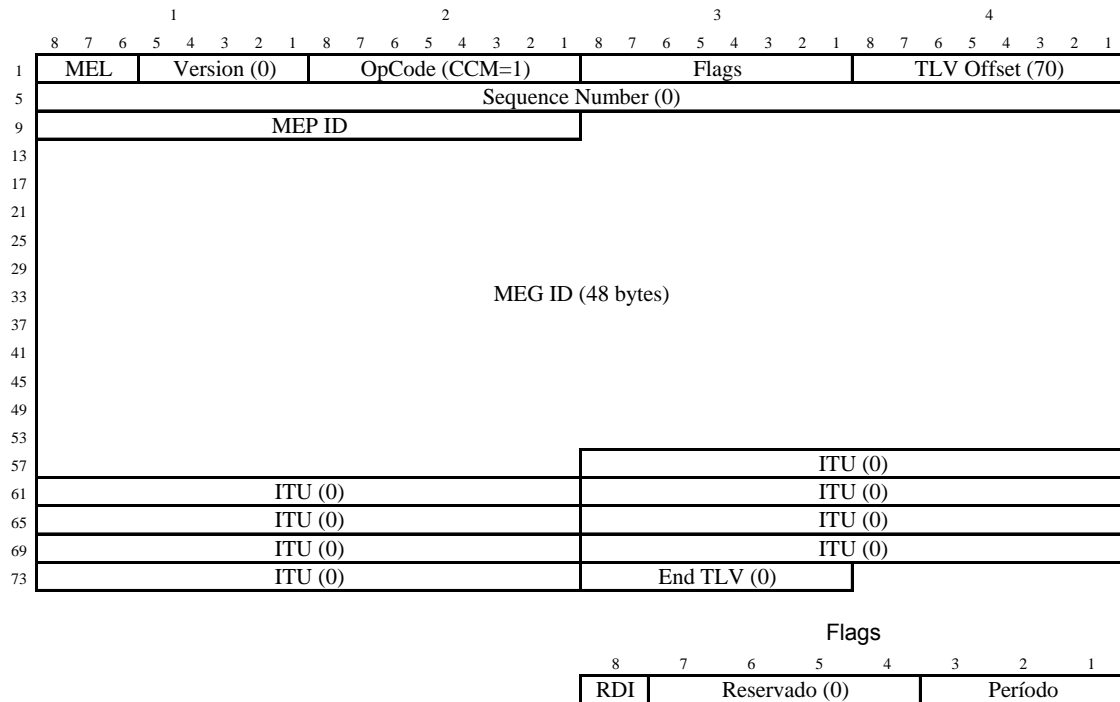


Figura 36. PDU CCM

Esta mensagem, que tem um tamanho total de 89 bytes, sendo 14 bytes referentes ao cabeçalho ethernet e os demais da CCM propriamente dita, foi gerada e enviada tendo como base os seguintes parâmetros e valores:

- ETHERTYPE = **0x8902** (CFM).
- MEG LEVEL (MEL) = **0x2**.
- OAM VERSION = **0x0**.
- OP CODE = **0x1** (CCM).
- FLAGS:
 - RDI = **0**.
 - PERÍODO (CCM INTERVAL) = **0x1** (3.33 ms).
- TLV OFFSET = **70**.
- SEQUENCE NUMBER = Contador inteiro de 32bits iniciado em “0”.
- MEP ID = Os dois últimos bytes do endereço MAC da estação.
- MEG ID:
 - MEG NAME FORMAT = **0x4** (String de Caracteres).

- MEG NAME LENGTH = Tamanho em bytes da string definida em MEG NAME.
- MEG NAME = "**ProjetoLT/Labtel/UFES**".
- SHORT MEG NAME FORMAT = **2** (String de Caracteres).
- SHORT MEG NAME LENGTH = Tamanho em bytes da string definida em SHORT MEG NAME.
- SHORT MEG NAME = "**ProjetoLT**".
- PADDING = Quantidade de bytes necessária para que o conjunto de campos que formam o MEG ID somem um total de 48 bytes. Definido pela seguinte expressão em C:

$$\text{PADDING} = 48 - (\text{sizeof}(\text{MEG_NAME}) - 1) - (\text{sizeof}(\text{SHORT_MEG_NAME}) - 1) - 4$$
- ITU = "0" para todos os 16 bytes.
- END TLV = "0" (valor padrão).

Para se iniciar o envio das mensagens OAM, a forma de uso do programa **CCM-TX** é a seguinte:

```
.\ccm-tx
```

Uma vez iniciado, o programa transmite as mensagens OAM tipo CCM ininterruptamente, segundo o período especificado, incrementando a cada mensagem enviada seu **SEQUENCE NUMBER**.

A fim de verificar a correta construção do quadro CCM por parte do módulo **CCM-TX**, capturamos alguns dos quadros enviados através da ferramenta *wireshark*. Esta ferramenta, com inúmeros recursos, possui nativamente a capacidade de decodificação de mensagens Eth-OAM.

Na Figura 37 pode ser observado o resultado da captura e decodificação do quadro CCM pela ferramenta *wireshark*. Todas as informações enviadas estão presentes e foram corretamente identificadas.

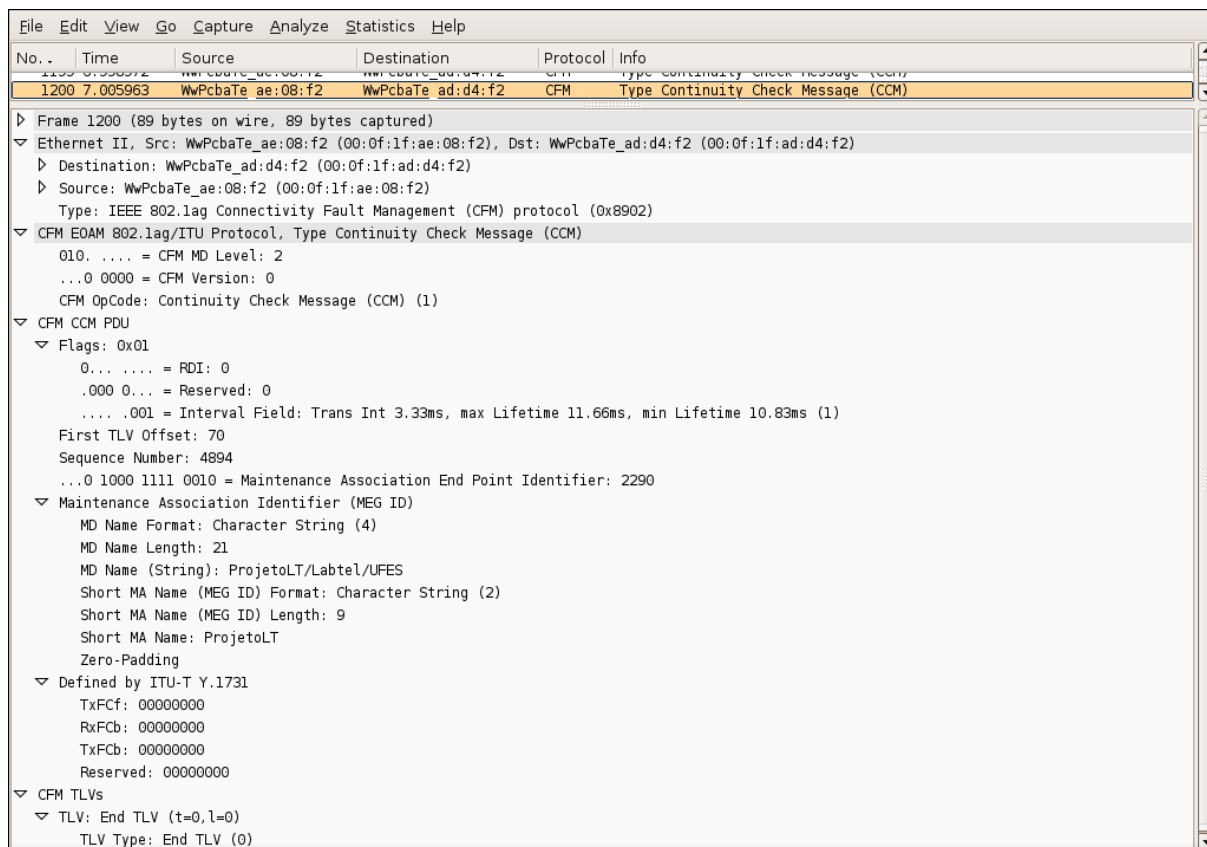


Figura 37. Quadro CCM capturado pelo *wireshark*

Uma vez verificada a integridade do módulo de transmissão, passamos à análise da recepção das CCMs pela estação de rede receptora.

No módulo de recepção **CCM-RX** da estação receptora, após a chegada da mensagem, o quadro ethernet é então totalmente decodificado. Neste módulo, através de parâmetros informados em sua inicialização, podem ser selecionadas duas sub-rotinas distintas que definem sua modalidade de operação: o modo “*debug*” e o modo “BER”. A forma de inicialização das sub-rotinas é a seguinte:

```
.\ccm-rx <parâmetro>
```

Onde “<parâmetro>” pode assumir os valores “debug” ou “ber”.

O primeiro deles, o modo de operação *debug*, tem por função decodificar completamente os quadros CCM recebidos, exibindo subsequente na tela as informações de forma estruturada. Um exemplo de quadro capturado pela ferramenta pode ser observado na Figura 38.

```

File Edit View Terminal Tabs Help
Inicializacao do Modulo CCM-RX...

Coletando dados de interfaces...
Indice da interface eth0:          3
Mac da interface local:           00:0f:1f:ad:d4:f2

Aguardando pacotes CFM/OAM...
Iniciando Modo "debug"...
entrou
Mac Origem:                       00:0f:1f:ae:08:f2
Ethertype:                        8902
MEG Level:                        2
CFM/OAM Version:                  0
CFM/OAM OpCode:                   01
CFM/OAM OpCodeFlags:              0000 0001 (1b RDI|4b Reserved|3b CCMInterval)
CFM/OAM First TLV Offset:         70
CFM/OAM CCM Sequence Number:     364544
CFM/OAM MEP ID:                   08f2 (2290)
CFM/OAM MEG Name Format:          4 (Char String)
CFM/OAM MEG Name Length:         21 bytes
CFM/OAM MEG Name:                 "ProjetoLT/Labtel/UFES  ProjetoLT"
CFM/OAM MEG Short Name Format:    2 (Char String)
CFM/OAM MEG Short Name Length:   9 bytes
CFM/OAM Short MEG Name:          "ProjetoLT"
CFM/OAM Padding:                 14 bytes
CFM/OAM ITU Field:               0000000000000000
root@Giga-02:/home/labtel/Desktop#

```

Figura 38. Quadro CCM capturado no modo *debug*

Através destes dados verifica-se que todas as informações contidas na mensagem enviada pelo **CCM-TX** foram corretamente recebidas e identificadas pelo módulo **CCM-RX**.

Já o segundo modo de operação, o BER, nos permite mensurar e tabular as estatísticas necessárias à análise do comportamento da rede, com base nas mensagens OAM recebidas.

Este modo coleta os dados exibidos na Tabela 9.

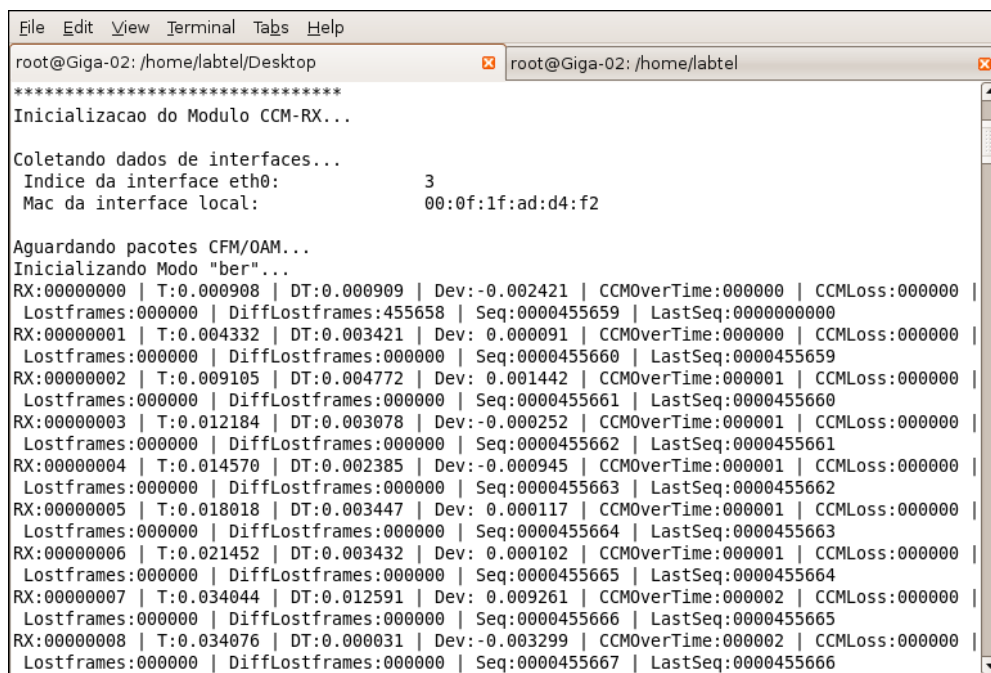
Campo	Descrição	Valor / unidade
RX	Número sequencial identificando o evento de recepção.	contador
T	Tempo total decorrido desde o início da coleta.	s
DT	Tempo decorrido desde o último quadro recebido sem erro.	s
Dev	Desvio do tempo DT em relação ao "period" OAM (3.33ms) esperado.	s
CCMOverTime	Número de eventos de estouro de tempo de recebimento da CCM.	contador
CCMLoss	Número de eventos em que foi detectada perda de continuidade pelo não recebimento de três mensagens CCM consecutivas.	contador
Lostframes	Quantidade acumulada de quadros perdidos desde o início do monitoramento.	contador
DiffLostframes	Quantidade de quadros perdidos no último evento de erro.	contador
Seq	Número de sequência deste quadro recebido.	inteiro
LastSeq	Número de sequência do quadro anteriormente recebido.	inteiro
ERR	Marcador que sinaliza, ao final da linha, os eventos de erro.	flag

Tabela 9. Dados coletados pelo CCM-RX-BER

Os dados coletados são registrados de duas formas: exibição direta na console e gravação em arquivo texto, de nome “estatisticas.txt”, já no formato *comma separated*

values (CSV). Este arquivo permite importação direta em quaisquer ferramentas de análise ou de geração de gráficos como Matlab, Excel ou Origin.

A forma em que as informações são exibidas na console e registradas em arquivo são as mostradas nas Figura 39 e Figura 40, respectivamente.



```

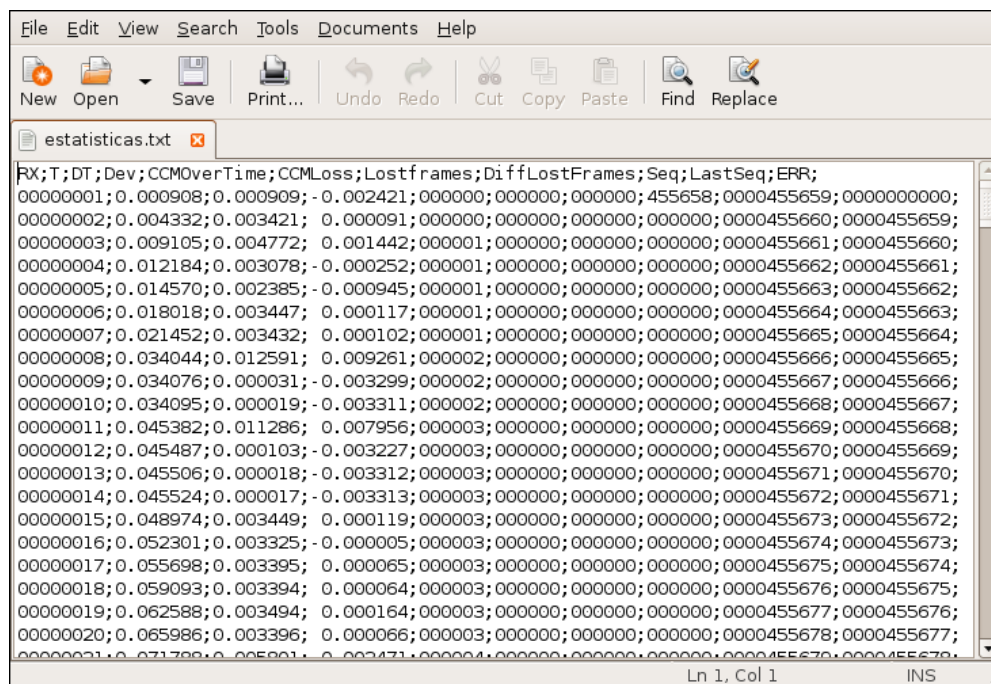
File Edit View Terminal Tabs Help
root@Giga-02: /home/labtel/Desktop root@Giga-02: /home/labtel
*****
Inicializacao do Modulo CCM-RX...

Coletando dados de interfaces...
Indice da interface eth0:          3
Mac da interface local:           00:0f:1f:ad:d4:f2

Aguardando pacotes CFM/OAM...
Iniciando Modo "ber"...
RX:00000000 | T:0.000908 | DT:0.000909 | Dev:-0.002421 | CCMOverTime:000000 | CCMLoss:000000 |
  Lastframes:000000 | DiffLastframes:455658 | Seq:0000455659 | LastSeq:0000000000
RX:00000001 | T:0.004332 | DT:0.003421 | Dev: 0.000091 | CCMOverTime:000000 | CCMLoss:000000 |
  Lastframes:000000 | DiffLastframes:000000 | Seq:0000455660 | LastSeq:0000455659
RX:00000002 | T:0.009105 | DT:0.004772 | Dev: 0.001442 | CCMOverTime:000001 | CCMLoss:000000 |
  Lastframes:000000 | DiffLastframes:000000 | Seq:0000455661 | LastSeq:0000455660
RX:00000003 | T:0.012184 | DT:0.003078 | Dev:-0.000252 | CCMOverTime:000001 | CCMLoss:000000 |
  Lastframes:000000 | DiffLastframes:000000 | Seq:0000455662 | LastSeq:0000455661
RX:00000004 | T:0.014570 | DT:0.002385 | Dev:-0.000945 | CCMOverTime:000001 | CCMLoss:000000 |
  Lastframes:000000 | DiffLastframes:000000 | Seq:0000455663 | LastSeq:0000455662
RX:00000005 | T:0.018018 | DT:0.003447 | Dev: 0.000117 | CCMOverTime:000001 | CCMLoss:000000 |
  Lastframes:000000 | DiffLastframes:000000 | Seq:0000455664 | LastSeq:0000455663
RX:00000006 | T:0.021452 | DT:0.003432 | Dev: 0.000102 | CCMOverTime:000001 | CCMLoss:000000 |
  Lastframes:000000 | DiffLastframes:000000 | Seq:0000455665 | LastSeq:0000455664
RX:00000007 | T:0.034044 | DT:0.012591 | Dev: 0.009261 | CCMOverTime:000002 | CCMLoss:000000 |
  Lastframes:000000 | DiffLastframes:000000 | Seq:0000455666 | LastSeq:0000455665
RX:00000008 | T:0.034076 | DT:0.000031 | Dev:-0.003299 | CCMOverTime:000002 | CCMLoss:000000 |
  Lastframes:000000 | DiffLastframes:000000 | Seq:0000455667 | LastSeq:0000455666

```

Figura 39. CCM-RX BER: exibição de dados na console



```

File Edit View Search Tools Documents Help
New Open Save Print... Undo Redo Cut Copy Paste Find Replace
estatisticas.txt
RX;T;DT;Dev;CCMOverTime;CCMLoss;Lastframes;DiffLastFrames;Seq;LastSeq;ERR;
00000001;0.000908;0.000909;-0.002421;000000;000000;000000;455658;0000455659;0000000000;
00000002;0.004332;0.003421; 0.000091;000000;000000;000000;000000;0000455660;0000455659;
00000003;0.009105;0.004772; 0.001442;000001;000000;000000;000000;0000455661;0000455660;
00000004;0.012184;0.003078;-0.000252;000001;000000;000000;000000;0000455662;0000455661;
00000005;0.014570;0.002385;-0.000945;000001;000000;000000;000000;0000455663;0000455662;
00000006;0.018018;0.003447; 0.000117;000001;000000;000000;000000;0000455664;0000455663;
00000007;0.021452;0.003432; 0.000102;000001;000000;000000;000000;0000455665;0000455664;
00000008;0.034044;0.012591; 0.009261;000002;000000;000000;000000;0000455666;0000455665;
00000009;0.034076;0.000031;-0.003299;000002;000000;000000;000000;0000455667;0000455666;
00000010;0.034095;0.000019;-0.003311;000002;000000;000000;000000;0000455668;0000455667;
00000011;0.045382;0.011286; 0.007956;000003;000000;000000;000000;0000455669;0000455668;
00000012;0.045487;0.000103;-0.003227;000003;000000;000000;000000;0000455670;0000455669;
00000013;0.045506;0.000018;-0.003312;000003;000000;000000;000000;0000455671;0000455670;
00000014;0.045524;0.000017;-0.003313;000003;000000;000000;000000;0000455672;0000455671;
00000015;0.048974;0.003449; 0.000119;000003;000000;000000;000000;0000455673;0000455672;
00000016;0.052301;0.003325;-0.000005;000003;000000;000000;000000;0000455674;0000455673;
00000017;0.055698;0.003395; 0.000065;000003;000000;000000;000000;0000455675;0000455674;
00000018;0.059093;0.003394; 0.000064;000003;000000;000000;000000;0000455676;0000455675;
00000019;0.062588;0.003494; 0.000164;000003;000000;000000;000000;0000455677;0000455676;
00000020;0.065986;0.003396; 0.000066;000003;000000;000000;000000;0000455678;0000455677;
00000021;0.071788;0.005891; 0.002471;000004;000000;000000;000000;0000455679;0000455678;
Ln 1, Col 1 INS

```

Figura 40. CCM-RX BER: arquivo de saída

Os dados coletados pelo **CCM-RX** permitem identificar problemas e gerar estatísticas de naturezas diversas, tais como:

- Taxa de perda de quadros (PER);
- *Delay*;
- *Jitter*;
- Quadros fora de seqüência;
- Enfileiramento indevido de mensagens OAM na rede, uma vez que este tipo de quadro devem ter prioridade sobre os demais quadros de dados;
- Falha de continuidade em circuito óptico.

Pela análise apresentada, podemos observar que, mesmo com um único tipo de mensagem OAM (CCM), é possível identificar uma grande variedade de problemas na infra-estrutura da rede LT.

5.3.4 Software Embarcado no Microcontrolador PIC:

Para que se pudesse controlar o *shutter* através de mensagens de rede, fez-se necessária a implementação de um módulo de *software*, embarcado no microcontrolador, que atuasse sobre o motor de passo.

Para este fim, desenvolvemos um programa em linguagem C (Seção 5.3.1) que tem por missão receber comandos via rede, executando subseqüentemente a ação equivalente sobre o conjunto motor-filtro.

Este programa atua mediante o recebimento via rede dos seguintes comandos:

- **1**: volta um passo no motor.
- **d**: avança um passo no motor.
- **110**: volta dez passos no motor.
- **f10**: avança dez passos no motor.

Uma vez recebida a mensagem, utilizamos 4 dos 8 bits da porta F, configurada em nosso caso com porta de saída, para acionamento dos 4 pinos de entrada do motor de passo. Visto que a saída do PIC possui limite de corrente de até 20mA, utilizamos um pequeno circuito *driver*, baseado em transistores, para acionamento do motor. Seu

movimento, nos sentidos horário e anti-horário, dava-se através da variação da seqüência de bits inserida na sua entrada.

A Tabela 10 mostra a seqüência de bits necessária para movimentar o motor no sentido desejado.

Sentido Horário				
Passo	Porta			
	F2	F3	F4	F5
h.1	1	0	0	0
h.2	0	1	0	0
h.3	0	0	1	0
h.4	0	0	0	1

(a)

Sentido Anti-horário				
Etapa	Porta			
	F2	F3	F4	F5
a.1	0	0	0	1
a.2	0	0	1	0
a.3	0	1	0	0
a.4	1	0	0	0

(b)

Tabela 10. Acionamento do MP. (a) Sentido horário (b) Sentido anti-horário

Cada giro do motor é composto das quatro etapas identificadas na Tabela 10. Isto redundava em dizer que para que o motor efetue uma volta completa, os sinais equivalentes às quatro etapas devem ser enviados a ele através da saída do microcontrolador. Existe ainda possibilidade de aumentar ainda mais a precisão do movimento do motor, utilizando uma seqüência de sinais que realiza movimentos de “meio passo”. Entretanto isto não foi necessário em nosso caso visto nossa demanda não requerer um posicionamento muito preciso.

5.4 Sumário:

Foram definidas neste capítulo plataformas de *hardware* e *software* que viabilizassem a implementação e avaliação da funcionalidade OAM sob uma rede LT.

Um par de conversores de mídia, com a missão de funcionar como transmissores e receptores, desempenham o papel de nós da rede LT e estabelecem o canal de dados do mesmo. Uma rede ethernet metálica padrão define o segmento de rede destinado às funções de supervisão e controle (S&C), que em nosso caso opera fora de banda.

Para a função do *shutter*, especificamos um dispositivo composto de um motor de passo interligado a um filtro mecânico do tipo FP, gerenciado por um microcontrolador. Este conjunto é totalmente operado via mensagens de rede. Suas características e forma de utilização são apresentadas nas Seções 5.2.4 e 5.3.4.

Para a implementação da funcionalidade CC OAM foram desenvolvidos dois módulos de software, denominados CCM-TX e CCM-RX (ver seção 5.3.3). Estes têm por missão, respectivamente, gerar/transmitir e receber/analisar mensagens OAM através da rede LT construída.

Capítulo 6: Avaliação de Desempenho da Proposta de Integração Via Funcionalidades OAM

Neste sexto capítulo apresentamos nossa proposta de integração entre as redes metropolitanas e LT por meio de funcionalidades OAM. Alguns cenários de aplicação da funcionalidade desenvolvida são avaliados, como o tempo de comutação do LT, diagnóstico (*debug*) de mensagens OAM e o comportamento do sistema na presença de ruído ASE e interferências homódinas.

6.1 Introdução:

As implementações descritas no capítulo anterior tiveram como objetivo possibilitar a realização de testes de avaliação de desempenho e de diagnóstico da arquitetura LT.

As funcionalidades implementadas nos permitem avaliar os seguintes quesitos:

- Tempo necessário para estabelecimento/comutação do LT;
- Efeitos da camada física, sob a forma de interferências por ruído faixa larga como o ASE e faixa estreita como o homódino;
- Estes fatores foram avaliados sob a ótica da:
 - Perda de quadros CCM;
 - Sequência dos quadros recebidos;
 - *Delay* e *Jitter*;
 - Enfileiramento de mensagens OAM no sistema avaliado;
 - Indicação de perda de continuidade do circuito óptico;

Toda a nossa avaliação baseou-se na ferramenta básica de Eth-OAM desenvolvida. Nas seções seguintes apresentaremos a metodologia utilizada, bem como os resultados obtidos.

6.2 Metodologia:

A fim de demonstrar as possibilidades de utilização das ferramentas OAM desenvolvidas em redes **metro-LT**, consideraremos nas seções seguintes alguns cenários em que as mesmas podem ser aplicadas.

6.3 Tempo de Comutação do LT:

O primeiro quesito avaliado foi quanto ao comportamento do filtro optomecânico como *shutter* em redes LT. Isto se deu através da identificação dos seus tempos de abertura e fechamento e das atenuações inseridas, quando presente em uma rede LT operando em 1550nm.

6.3.1 Caracterização do *shutter*:

O processo de caracterização de funcionamento do *shutter* em operação na rede LT foi dividido em algumas etapas. Em todas estas etapas utilizamos a configuração demonstrada pela Figura 41:

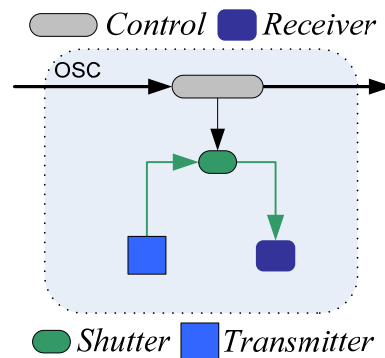


Figura 41. Configuração para caracterização do *shutter*

Neste arranjo, as portas TX e RX dos conversores de mídia fazem as vezes de *transmitter* e *receiver*. Já o conjunto *shutter-control* foi implementado pelos elementos descritos na Seção 5.2.4.

6.3.1.1 Etapa 1: Contraste entre os níveis de atenuação ON/OFF

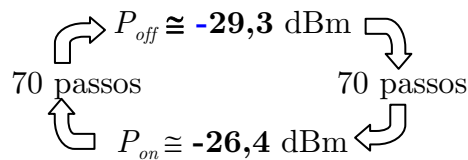
Na primeira das etapas, mensuramos o contraste entre os níveis de atenuação nas posições “aberta” (ON) e “fechada” (OFF) do *shutter*, que correspondem respectivamente aos estados em que o sinal óptico tem sua passagem permitida ou bloqueada. O objetivo aqui era a identificação dos pontos de abertura e fechamento do *shutter*, informação esta imprescindível para a realização da etapa seguinte.

A fim de obter uma referência para os sinais avaliados, iniciamos o procedimento pela medição do nível de sinal na saída do *transmitter* através de um medidor de potência óptica. O valor obtido foi de **-3,10 dBm**.

Seguimos então com posicionamento do *shutter* no estado ON, no ajuste em que o receptor percebia o maior nível de sinal. Registrou-se para este ponto o nível de sinal óptico que chegava ao *receiver*. O valor obtido foi de **-4,9 dBm**, o que nos denota uma perda de inserção do filtro de **1,8 dB**.

A partir daí, a posição do *shutter* foi ajustada lentamente pelo sistema de controle até o ponto exato em que se detectasse perda de comunicação³⁴ (*fiber link down*) entre o *transmitter* e o *receiver*. Este ponto equivale ao nível de sinal de transição entre o estado ON→OFF. Considerando que a intensidade do sinal do *transmitter* é sempre constante, podemos considerar que este ponto corresponderá sempre à situação OFF do *shutter*, a qual denominamos posição P_{off} .

Uma vez identificado o P_{off} o *shutter* foi comandado a retornar um número de passos suficientes para que a comunicação se restabelecesse. Denominamos este ponto P_{on} . Os níveis de sinal e número de passos obtidos para as transições $P_{off} \leftrightarrow P_{on}$ foram:



Isto redundava em dizer que a mínima diferença de atenuação, identificada entre os pontos de ajuste do *shutter* para os estados ON e OFF, é de **2,9 dB**.

Vale observar que, diferentemente do que poderíamos imaginar, o estado P_{on} só foi atingido em um nível de **-26,4 dBm**, e não no valor imediatamente anterior ao de

³⁴ Quando o sinal cai a um nível abaixo do mínimo para recepção.

P_{off} , o que denota a presença de algum grau de histerese no sistema de detecção de *link* do conversor de mídia.

6.3.1.2 Etapa 2: OAM monitorando o *shutter*

Nesta segunda etapa da caracterização do *shutter*, objetivamos identificar a velocidade de abertura e fechamento do *sistema* opto-mecânico, ou seja, o tempo necessário para realizar a transição entre os estados $P_{off} \leftrightarrow P_{on}$. Diferentemente da etapa anterior, esta operação foi realizada através da funcionalidade OAM e não através do monitoramento em camada física, mantendo-se, entretanto os níveis de potência de transmissão. A identificação precisa deste parâmetro serve com base para quantificar a capacidade de comutação do sistema LT, isto é, sua capacidade de atendimento de requisições de estabelecimento de novos LTs e/ou de alteração dos existentes.

O procedimento iniciou-se posicionando o *shutter* em seu estado OFF e carregando os módulos CCM-TX e CCM-RX-BER. O *shutter* foi então movimentado, agora em sua velocidade nominal, um número de passos suficientes para que o sistema realizasse a transição para o estado P_{on} , retornando em seguida à posição P_{off} . Este processo foi executado repetidas vezes para obtenção de dados estatísticos.

Coube ao sistema OAM a missão de mensurar os intervalos de tempo entre os estados P_{on} e P_{off} . A Tabela 11 exibe uma amostra dos eventos capturados. Nesta tabela são mostrados apenas os dados relativos aos eventos de abertura e fechamento do *shutter*. As demais informações coletadas foram descartadas, visto não terem sido notados quaisquer outros eventos significativos.

O sistema OAM desenvolvido permitiu detectar precisamente os instantes de comutação do *shutter* por meio da identificação das situações de perda de continuidade. Conforme a especificação descrita na Seção 4.4.1.2, caso o *receiver* deixe de receber mensagens OAM durante um intervalo de tempo maior que 3,5 vezes o período padrão, um evento de perda de continuidade é sinalizado. Em nosso teste controlado, na ausência de qualquer outro evento indesejado, a perda de continuidade está exclusivamente associada à abertura/fechamento do *shutter*, visto não existirem neste caso quebras de fibras, falhas de equipamentos, etc...

A coluna **DT** da tabela indica a duração dos eventos em questão. Vale ressaltar que o tempo de interrupção no fluxo de mensagens OAM contempla dois

intervalos de transição: $P_{on} \rightarrow P_{onf}$ e $P_{off} \rightarrow P_{on}$. Isto quer dizer que, partindo-se do princípio que o número de passos entre cada estado é o mesmo, o tempo de transição entre um estado e outro equivale à metade deste intervalo.

RX	T	DT	Dev	CCMLoss	Lostframes	DiffLostFrames
968	3,742903	0,487508	0,484178	1	144	144
1118	4,742949	0,498341	0,495011	2	291	147
1266	5,736295	0,495777	0,492447	3	438	147
1416	6,728858	0,490856	0,487526	4	583	145
1567	7,722155	0,488255	0,484925	5	727	144
1718	8,712119	0,48491	0,48158	6	870	143
1870	9,701289	0,480724	0,477394	7	1012	142
2022	10,701377	0,488301	0,484971	8	1157	144
2173	11,698067	0,491624	0,488294	9	1302	145
2324	12,697321	0,494978	0,491648	10	1448	146
2473	13,697353	0,501636	0,498306	11	1596	148
2620	14,690718	0,501738	0,498408	12	1744	148
2767	15,676538	0,495036	0,491706	13	1890	146
2918	16,656415	0,474836	0,471506	14	2030	140
3075	17,638828	0,457201	0,453871	15	2165	135
3236	18,635537	0,458014	0,454684	16	2300	135
3395	19,635569	0,467952	0,464622	17	2438	138
3552	20,631477	0,470687	0,467357	18	2577	139
3709	21,628168	0,471453	0,468123	19	2716	139
3865	22,628218	0,478141	0,474811	20	2857	141

Tabela 11. Amostra de eventos de comutação do *shutter*

Após várias repetições, as distribuições de intervalos de tempo de transição e da quantidade de quadros perdidos em cada evento podem ser observadas na Figura 42.

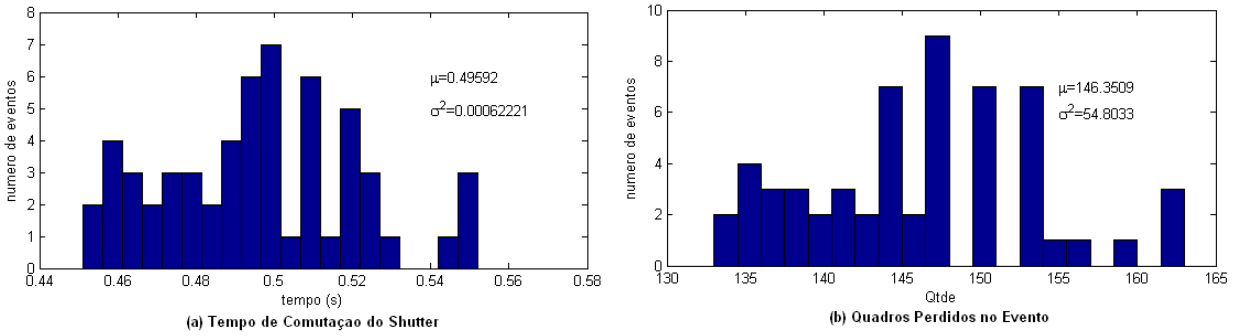


Figura 42. Histogramas (a)Tempo de comutação do *shutter* (b)Quadros perdidos durante o evento

Da Tabela 11 podemos observar que a cada comutação do *shutter* está associado um evento **CCMLoss**, evento este que denota perda de continuidade na rede, conforme explicado anteriormente. Isto demonstra que esta métrica pode ser utilizada pelo sistema metro-LT como forma de verificar/confirmar as ordens de abertura e fechamento dos *shutters*, ou seja, as comutações dos LTs.

Um ponto digno de nota é quanto à estabilidade do *shutter* opto-mecânico implementado. Durante os testes observamos que após sucessivas operações de abertura e fechamento o sistema divergia do *set-point* de partida. Em decorrência disto, passava a não mais transitar entre os estados P_{on} e P_{off} , mantendo-se em apenas um deles. Este comportamento mostra a necessidade de complementação futura do sistema para uma modalidade de operação em malha fechada, por exemplo via amostragem do nível de sinal óptico por uma porta analógica do microcontrolador.

Ao realizarmos uma comparação com outros tipos de filtros listados na Tabela 1 (Seção 2.1.2.6), denota-se que a velocidade de operação do sistema *shutter* desenvolvido está longe da ideal, quando pensamos na velocidade de comutação requerida pelos OXC e OADMs das redes WDM atuais. Contudo, para o universo das redes LT, em que os caminhos ópticos são mantidos por longos intervalos de tempo e que a necessidade de comutações é reduzida, os tempos de comutação experimentalmente observados atendem perfeitamente às demandas, tornando a solução viável.

Quanto à aplicabilidade prática em redes metro-LT, pudemos verificar pelo experimento que o quadro CCM, quando utilizado em testes de continuidade, pode servir para fins de verificação/confirmação do estado do LT. Esta verificação poderá ser utilizada, por exemplo, nas seguintes situações:

- após comandada a atuação de um *shutter*, mensagens OAM podem ser enviadas para verificar o instante em que a comutação se concluiu. Isto permite que o plano de controle possa passar à próxima etapa do processo de formação/destruição/alteração do LT, sinalizando ao nó requisitante que o LT está efetivamente estabelecido.
- monitoramento fim-a-fim da integridade do LT para fins de proteção.
- medidas estatísticas de QoS relativas à disponibilidade do LT.

6.4 Diagnóstico de mensagens OAM:

Outra aplicação da ferramenta CCM-RX é no diagnóstico de mensagens OAM. Esta ferramenta, em seu modo *debug*, permite decodificar completamente qualquer quadro CCM recebido. Através de seu uso podem ser detectadas as falhas ligadas à

OAM listadas na Seção 4.4.1.2, como: *Unexpected MEG Level*, *Mismerge*, *Unexpected MEP* e *Unexpected Period*.

A Figura 38, da Seção 5.3.3, exibe um exemplo de mensagem decodificada pela ferramenta.

Nas redes LT práticas, esta funcionalidade pode ser utilizada para isolamento e localização de falhas em LT ativos. Considerando que as mensagens OAM de um determinado LT devem permanecer confinadas ao seu âmbito (dentro do MEG), quadros OAM “intrusos” com conteúdo divergente do esperado indicam o “vazamento” da mensagem de um LT para outro. Este fato está normalmente associado a falhas na segmentação física dos sinais ópticos na rede, decorrentes de problemas na atuação dos *shutters* ou no plano de controle (BUGs). O uso da ferramenta para se identificar o MEP ID e MEG ID destes quadros intrusos nos permitiria localizar precisamente o ponto de falha.

6.5 Monitoramento de Performance da Camada Física:

Outro quesito que pode ser avaliado por meio da funcionalidade OAM implementada é a análise qualitativa do canal de comunicação, através da avaliação do comportamento do sistema LT na presença de sinais interferentes.

Esta avaliação pode ser utilizada para diversos fins. Um deles é na detecção e isolamento de falhas na rede, quando se deseja diagnosticar algum comportamento anormal do sistema. Nesta situação, a aplicação das funcionalidades OAM em uma avaliação de qualidade de cada um dos enlaces pode possibilitar a identificação do segmento da rede óptica causador da anormalidade.

Outra aplicação está relacionada à oferta e garantia de qualidade de serviço. A funcionalidade OAM implementada pode ser, por exemplo, aplicada durante a admissão de uma nova conexão via análise prévia de um segmento óptico, a fim de verificar a viabilidade do atendimento de um determinado requisito de BER máxima aceita. Para os casos em que o LT já se encontre estabelecido, a mesma função pode ser utilizada para verificar se estes requisitos de QoS estão sendo garantidos, como normalmente exige-se em contratos de SLA (*Service Level Agreement*).

Como demonstração da viabilidade da ferramenta, a aplicaremos na análise de duas situações extremas de sinais interferentes: interferência banda larga por ruído

ASE e banda estreita por sinal interferente homódino. Vale denotar a enorme diferença no comportamento de interferências destas duas naturezas, fato que será demonstrado mais adiante.

Um ponto importante a se ressaltar é que, embora a normatização relativa à CCM especifique diversos intervalos padrão para envio das mensagens (ver Seção 4.4.1.2.1), tendo cada um sua função específica, em nosso caso adotamos o intervalo de **3,33ms** (300qps) para todas as nossas avaliações. Entretanto nada impede que se utilizem quaisquer outros dos intervalos constantes das especificações normativas.

6.5.1 Comportamento na Presença de Ruído ASE:

A proposta da arquitetura LT contempla a existência de elementos de amplificação óptica ao longo da rede, visando aumentar seu alcance, ou mesmo dentro em cada LAU, assumindo a função de pré-amplificadores. Todavia o processo de amplificação óptica tem como característica inerente a inserção de ruído ASE. Neste caso é primordial a existência de uma forma de mensuração da influência do ruído sobre a qualidade da transmissão.

Através da funcionalidade OAM implementada, propomos avaliar, de forma indireta e não invasiva, um cenário prático do acúmulo de ruído ASE em uma rede LT. Para realização desta avaliação construímos o arranjo da Figura 43.

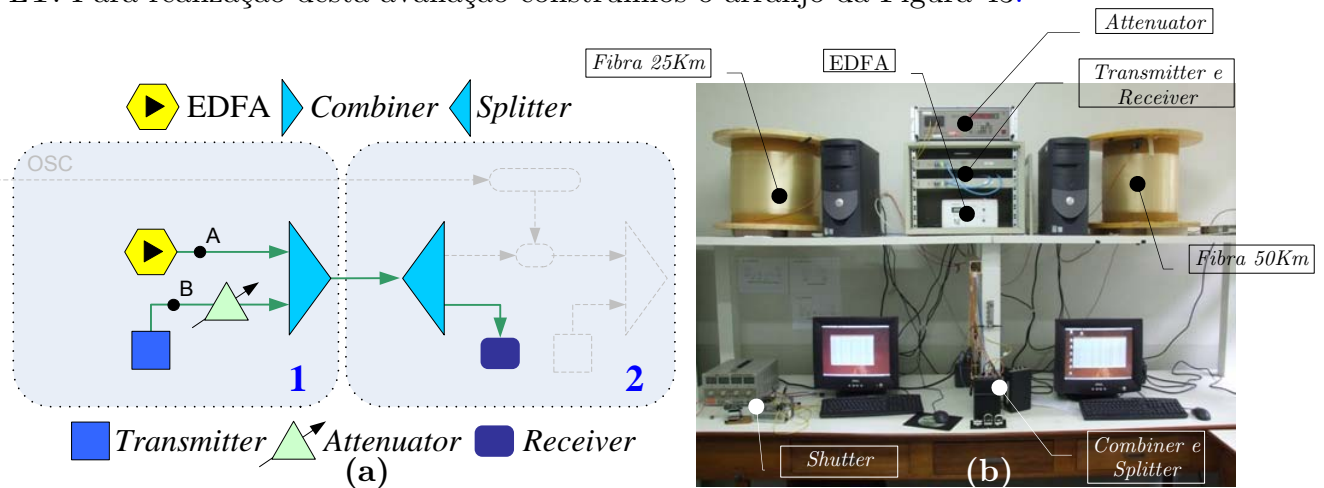


Figura 43. Arranjo para avaliação de interferência por ruído ASE (a) diagrama lógico (b) configuração física

Esta “não invasividade” caracteriza-se pela idéia de impossibilidade de acesso físico aos segmentos e nós remotos da rede. O único componente com o qual transacionamos é o subsistema OAM-RX, presente no elemento ativo da rede remota.

Com base nesta troca de mensagens estimamos a qualidade do canal óptico através de sua BER.

Neste arranjo o amplificador óptico EDFA tem a missão de atuar exclusivamente como fonte de ruído ASE, uma vez que a caracterização será feita em função da relação sinal-ruído óptica (OSNR) no receptor, a qual influencia diretamente na BER a ser estimada. O atenuador (*attenuator*), por sua vez, permite controlarmos o nível do sinal que concorre no meio com o ruído interferente, nos possibilitando manualmente cobrir a faixa de OSNR do canal. Estes dois sinais são então combinados para que sejam entregues ao *receiver*.

Os experimentos foram realizados com base nos seguintes parâmetros iniciais:

- Nível de sinal na saída do *transmitter* (Ponto A): **-3,1 dBm**.
- Nível de sinal (ruído ASE) na saída do EDFA (Ponto B): **-6,4 dBm (corrente de bombeio de 73mA)**.

Note que para a configuração apresentada na **Figura 43a**, a máxima OSNR no receptor seria de **3,3 dB**.

As medições deram-se com o carregamento das ferramentas CCM-TX e CCM-RX-BER nas estações de rede transmissora e receptora, respectivamente. Com os programas em funcionamento e coletando os dados desejados, fixamos a corrente de bombeio de nosso amplificador EDFA. Através do atenuador óptico ajustável, variamos a intensidade do sinal óptico do *transmitter* coletando dados em pontos distintos de atenuação, partindo do melhor caso, quando não se detectavam erros, chegando ao pior, onde não se detectava recebimento de quadros pelo CCM-RX. Esta operação nos possibilitou avaliar o comportamento do sistema em vários cenários de OSNR distintos.

Para cada ponto de leitura, o critério de parada utilizado foi o de recebimento de 10.000 quadros íntegros ou de um tempo total de coleta de 60s, sendo a leitura interrompida quando qualquer um dos critérios fosse atendido. O limite de tempo de 60s foi imposto em decorrência de ser inviável aguardar o recebimento dos 10.000 quadros válidos na medida em que aumentávamos a atenuação do sinal do *transmitter*.

A Figura 44 apresenta, na forma gráfica, a taxa média de perda quadros CCM (CCM *Loss Rate* – CCMLR) ao longo do intervalo de tempo do experimento, em função da OSNR. Os valores foram calculados com base nos dados coletados pela ferramenta. Esta medição foi feita considerando a banda completa de nossa fonte de ruído (EDFA), que é de aproximadamente 30nm (OSNR/30nm). Uma aproximação para a equivalência das medidas em 1nm (OSNR/1nm) é apresentada na escala superior do gráfico.

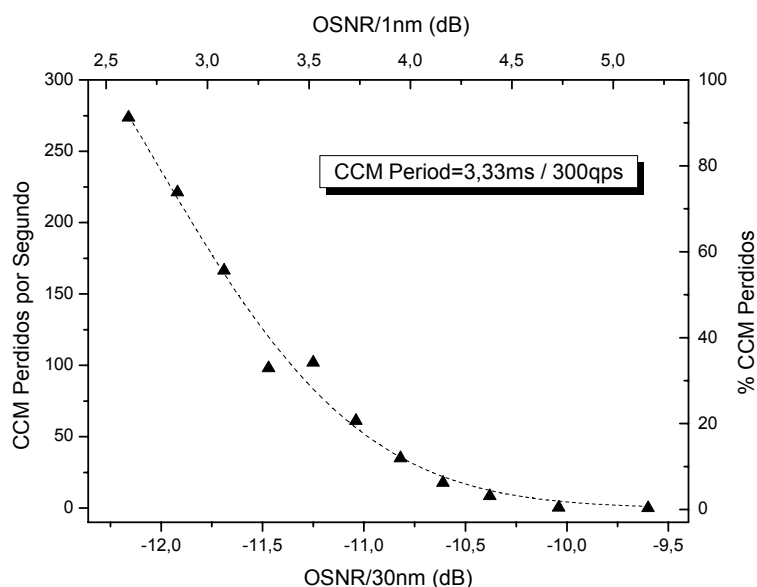


Figura 44. CCM perdidos por segundo x OSNR.

Da figura podemos observar que valores de OSNR inferiores a **-12dB/(30nm)** resultam em perdas próximas a 300 qps, o que equivale a dizer que quase todos os quadros CCM enviados estão sendo descartados. Por outro lado, valores melhores que **-10dB/(30nm)** se traduzem em perdas praticamente nulas.

Pode causar estranheza que a OSNR resultante tenha se mostrado negativa. Isto é possível visto a baixa sensibilidade³⁵ de nosso receptor ($\cong -26\text{dBm}$).

Fazendo uma análise mais detalhada dos dados referentes aos valores de CCMLR mensurados, fixamos a OSNR para verificar o comportamento da série temporal da perda de quadros CCM por segundo. Notou-se na Figura 45 o

³⁵ Alto ruído térmico. O ruído ASE-ASE dominante neste caso deve ficar abaixo do patamar do ruído térmico. O receptor, portanto, continua dominado por ele.

comportamento estacionário da influência da ASE, apesar da variabilidade da perda ser incrementada com a redução da OSNR.

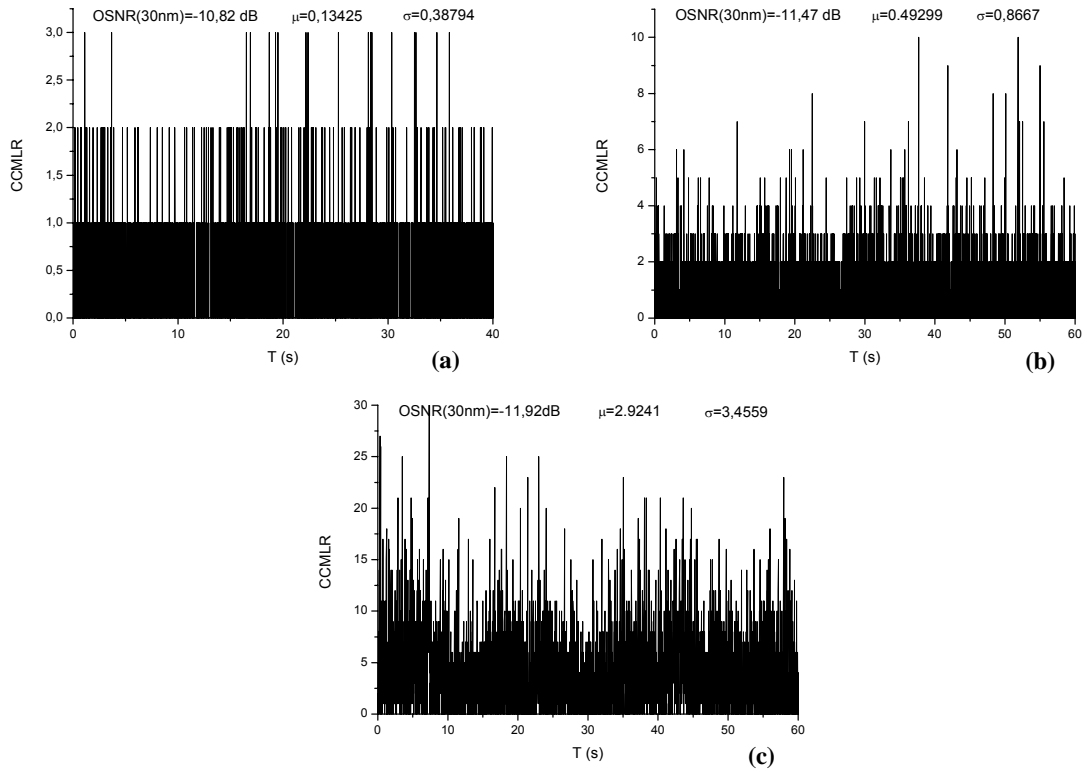


Figura 45. CCMLR x Tempo (a) -10,82dB (b) -11,47dB (c) -11,92dB

Realizada a caracterização dos efeitos do ruído ASE sobre o sistema, partimos então ao nosso objetivo principal: estimar uma BER em função da perda de quadros CCM.

Os dados coletados pela ferramenta OAM nos permitem realizar esta estimativa a partir da CCMLR mensurada, com base nas seguintes considerações:

- que o CRC detecta 100%;
- que basta 1 erro por quadro (excetuando-se apenas o preâmbulo e o *start of frame*, não cobertos pelo CRC) para que este seja totalmente descartado;
- que o conversor de mídia empregado não utiliza a codificação de linha 8B/10B, fato detectado experimentalmente pela observação da duração temporal dos quadros em meio óptico.
- Que os erros são descorrelacionados.

A taxa de perda de quadros CCM é função da taxa de erro de bit (BER) conforme a Equação (1), deduzida da expressão de probabilidade de erro de bit.

$$\frac{CCMLR}{CCM_{rate}} \cong \left[1 - (1 - BER)^{T_{frame}} \right] \quad (1)$$

Portanto a BER pode ser estimada utilizando-se a Equação (2).

$$BER \cong 1 - 10^{\frac{\log_{10} [1 - (CCMLR / CCM_{Rate})]}{T_{frame}}} \quad (2)$$

Onde:

- CCMLR = Número de quadros CCM perdidos por segundo, medida pelo sistema OAM.
- CCM_{rate} = Número de quadros CCM enviados por segundo.
- T_{frame} = tamanho do quadro CCM utilizado, em bits.

Conforme mencionado anteriormente, em nossas medições utilizamos o menor intervalo de tempo (maior taxa) padronizado para os quadros CCM³⁶. Isto redundava em dizer que enviaremos mensagens a uma taxa de:

$$T_{envio} = CCM_Rate \times Tamanho_do_Quadro \times 8bits \quad (3)$$

O que numericamente resulta em:

$$T_{envio} = 300qps \times 89bytes \times 8bits = 213600bps \quad (4)$$

Sendo que os 89 bytes do quadro estão divididos da seguinte forma:

- 14 bytes do cabeçalho ethernet;
- 71 bytes da CCM; e
- 4 bytes do CRC-32.

Em um intervalo de 60s do experimento, o número de bits enviados perfaz um total de 12.816.000, quantidade insuficiente para se diagnosticar BER inferiores a 10⁻⁷. Nesta taxa de envio de mensagens, o diagnóstico de BER da ordem de 10⁻⁹ demandaria um intervalo de medição de 4.682 s, ou 1,5h, quantidade de tempo inviável para utilização do CCM como verificação de SLA no estabelecimento do LT. Pelo exposto, visto em nosso caso termos enviado quadros CCM em sua maior taxa

³⁶ 3,33ms ou 300qps

padronizada, o uso de quaisquer das outras das taxas de envio demandará intervalos de tempo de medição ainda maiores, dificultando a estimativa. Ainda com base nesta característica, outro fator a ser considerado é que, dada a necessidade de períodos mais longos de medição, mudanças dinâmicas na rede, que resultem na não-estacionariedade da BER, não serão imediatamente percebidas pelo sistema OAM. Todavia para fins de monitoramento contínuo de um LT ativo tal ferramenta apresenta-se como uma boa alternativa.

Com base nos diversos valores de CCMLR obtidos nas medições em cada situação distinta de OSNR, foi possível construirmos o gráfico da Figura 46, que exhibe a BER estimada em cada uma destas situações.

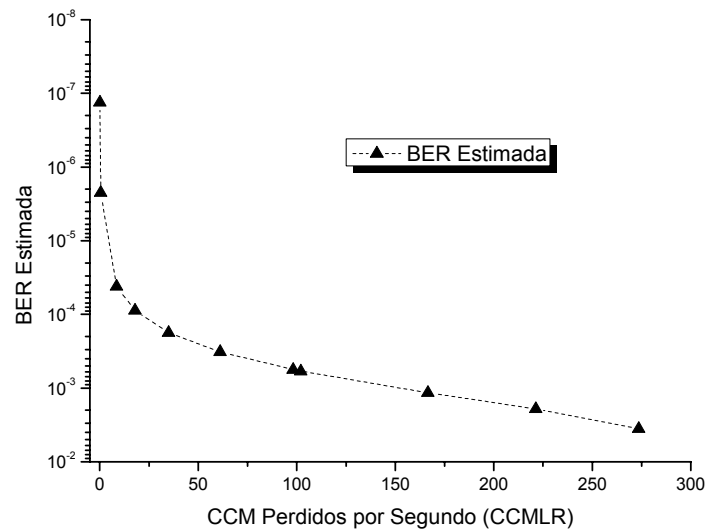


Figura 46. Estimativa de BER em função da CCMLR (ASE)

Como esperado, não foi possível quantificar um valor de BER inferior a 10^{-7} em função do intervalo de medida adotado. Observa-se também que valores de CCMLR inferiores a **25 qps** traduzem-se em valores de BER inferiores a 10^{-4} .

É importante ressaltar que em nosso caso não foi utilizado nenhum tipo de filtragem óptica do sinal no lado receptor, no sentido de restringir a largura de banda do ruído que a ele chega. Todavia em sistemas WDM (multilambda), o processo de demultiplexação em si naturalmente restringe a largura do sinal³⁷ em suas saídas, o que influencia diretamente na OSNR do sinal óptico que chega ao fotodetector,

³⁷ E conseqüentemente do ruído

levando-o a melhores resultados que os obtidos aqui. Em suma, nossa análise pode ser considerada como um “pior caso” quando comparada a um sistema WDM típico.

A aplicação prática desta funcionalidade é a de informar ao plano de controle o desempenho estimado do canal óptico, não só do ponto de vista de gerenciamento, mas também de ajuste de MTU ótimo para os quadros de dados em função do valor de BER estimado.

6.5.2 Interferência Homódina:

A interferência homódina em redes LT caracteriza-se por situações em que, por imperfeições e falhas nos *shutters*, um determinado comprimento de onda de um LT “vaza” e sobrepõe o sinal óptico do segmento seguinte, que utiliza o mesmo comprimento de onda. Também podem ocorrer eventos em que, por falha no mecanismo de controle de acesso ao meio, um nó intermediário transmite em conjunto com outro, sobrepondo seu sinal ao do outro e atuando como fonte de interferência para aquele que primeiro iniciou a comunicação. A interferência heteródina, por sua vez, ocorre em situação semelhante, porém com comprimentos de onda diferentes. Considerando que em redes metro ethernet a tecnologia CWDM tende a ser mais aplicada, a tendência é nas redes metro-LT a interferência homódina venha a predominar.

Nas redes ópticas práticas, embora haja fontes ópticas que operam nominalmente em um mesmo comprimento de onda, sempre existem pequenas diferenças na frequências geradas pelos diversos LASERs. Isto faz com que o grau de interferência mútua de sinais homódinos tenda a se amenizar. Em nosso experimento, avaliamos o pior caso para a interferência homódina, onde ambos os sinais, principal e interferente, possuem exatamente o mesmo comprimento de onda. Entretanto não seria razoável estudar um cenário onde as fontes possuam coerência de fase. Para contornar esta questão, inserimos um segmento de fibra adicional pelo qual trafegou o sinal interferente. Este segmento tinha comprimento físico bem superior ao comprimento de coerência para fonte óptica, conforme informado pelo fabricante do conversor de mídia. Todavia, os valores informados na literatura para LASERs DFB³⁸

³⁸ Utilizado pelo fabricante do equipamento em questão

mostram que em regime contínuo estes apresentam uma largura de linha de 0,1pm (equivalente a dezenas de MHz).

Usando a Equação 5 [20], pode-se determinar o comprimento de coerência de fontes ópticas operando com comprimento de onda central λ , com largura de linha $\Delta\lambda$, em um meio com índice de refração n . Para o pior caso considerado, teríamos um comprimento de coerência de apenas **16 m**.

$$L = \frac{\lambda^2}{n\Delta\lambda} \quad (5)$$

Outra característica importante deste tipo de sinal interferente é que, diferentemente da modalidade ASE, a interferência homódina é influenciada pela relação entre a polarização dos sinais interferentes e principal. Para avaliar este comportamento, o sinal interferente também teve sua polarização controlada, permitindo analisarmos sua influência nos dois extremos: polarização paralela ou perpendicular.

Para que pudéssemos contemplar as questões discutidas acima, em nosso experimento o sinal interferente foi gerado a partir de uma derivação do sinal original. A Figura 47 apresenta o arranjo construído para o experimento, onde pode ser observada esta característica. Demonstraremos que as ferramentas OAM desenvolvidas também permitem a avaliação do comportamento do sistema neste cenário. Esta funcionalidade aplica-se aos casos em que o sinal interferente não possui intensidade suficiente para ser detectado pelo sistema de diagnóstico de mensagens OAM, descrito na Seção 6.4, porém tenha ainda capacidade de ocasionar erros de recepção.

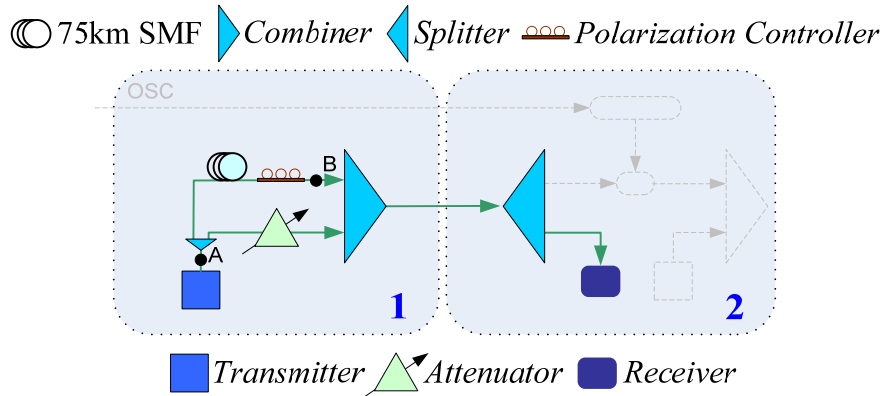


Figura 47. Arranjo para avaliação da interferência homódina.

Em nosso *setup*, por meio de um *splitter*, o sinal do *transmitter* é dividido em dois³⁹, onde parte dele segue para um atenuador e o restante para um segmento de fibra de 75km em série com um controlador de polarização. A função deste lance de fibra é atrasar o sinal interferente em relação ao principal, eliminando sua coerência de fase. Já o controlador de polarização tem a missão de permitir o ajuste da polarização deste sinal. Estes sinais são então reunidos em um *combiner* antes de serem entregues ao *receiver*.

Com este arranjo, dois extremos de interferências homódinas foram avaliados. O primeiro deles foi o da situação em que o sinal principal e o interferente estão presumidamente polarizados perpendicularmente entre si. Este é considerado o “melhor caso” visto ser o ajuste de menor interferência possível entre os sinais.

No segundo extremo, o sinal principal e o interferente chegam ao fotodetector com a mesma polarização. Esta situação resulta no “pior caso” de interferência.

Os experimentos foram realizados com base nos seguintes parâmetros iniciais:

- Nível de sinal na saída do *transmitter* (Ponto A): **-2,32 dBm**.
- Nível do sinal interferente (Ponto B): **-21,27 dBm**.

Assim, o maior valor de relação sinal interferência óptica (*Optical Signal-Interference Ratio* – OSIR) é de **18,95 dB**.

6.5.2.1 Extremo 01: Melhor caso

Este procedimento foi iniciado pelo ajuste do controlador de polarização (*polarization controller*) para a situação em que o sinal interferente se posicionasse presumidamente de forma perpendicular em relação ao principal. Em seguida identificamos o ponto de ajuste do atenuador a partir do qual começavam a ser detectadas perdas pelo sistema OAM, previamente carregado. Tendo este como ponto de partida, foram obtidos outros pontos de leitura até que não fossem mais recebidos quadros no módulo CCM-RX-BER. Os critérios de parada utilizados foram os mesmos da seção anterior.

³⁹ (50% + 50%)

Diferentemente do que ocorreu nas medições relacionadas ao ruído ASE, o caso da interferência homódina não demanda nenhum tipo de correção da OSIR, pois ambos os sinais possuem exatamente a mesma largura espectral.

6.5.2.2 Extremo 02: Pior Caso

Para este cenário ajustamos o filtro polarizador para a situação em que o sinal interferente estivesse presumidamente com polarização paralela em relação ao sinal principal. Realizamos então o mesmo procedimento de medida utilizado na etapa anterior.

Com base nos dados coletados nos dois experimentos, apresentamos na Figura 48, na forma gráfica, a taxa média de perda quadros CCM (CCM *Loss Rate* – CCMLR) ao longo do intervalo de tempo do experimento, em função da OSIR. Os valores foram calculados com base nos dados coletados pela ferramenta OAM desenvolvida.

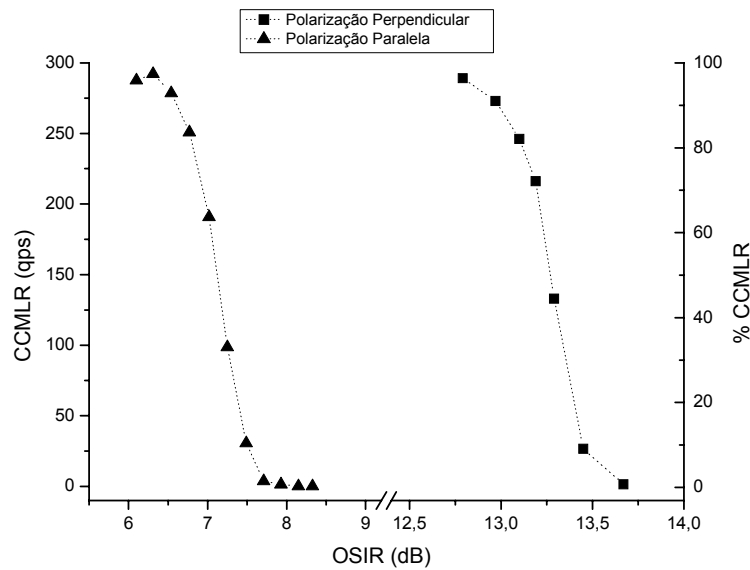


Figura 48. CCMLR x OSIR para polarização perpendicular e paralela

Observa-se nos dois casos a enorme susceptibilidade do sistema a este tipo de interferência. Diferenças da ordem de apenas **1 dB** na OSIR foram suficientes para levar o sistema de uma condição de perda total dos quadros CCM para outra de perda próxima a zero, enquanto que no caso do ASE esta diferença chegava a **2,5 dB**.

Estes extremos analisados caracterizam bem um sistema real, que normalmente operará “flutuando” em algum ponto do intervalo compreendido entre cada uma destas situações. Esta característica não-estacionária deste tipo de interferência pôde ser percebida claramente ao realizarmos um monitoramento de longa duração.

Para realização desta leitura, ajustamos inicialmente o controlador de polarização para uma posição de alta perda (OSIR de aproximadamente **13 dB**). Em seguida iniciamos os módulos CCM-TX e CCM-RX-BER, deixando que coletassem dados por vários minutos sem que fosse feita qualquer intervenção no sistema. A Figura 49 exibe os resultados obtidos para as perdas de quadros CCM (CCMLR) ao longo do tempo.

Observamos que nos primeiros segundos desta coleta são percebidas seqüências de perdas de aproximadamente 400 quadros sucessivos. Nos instantes seguintes esta perda atinge 22000 quadros consecutivos perdidos. Após 110 segundos de coleta, a perda cai abruptamente chegando a zero após os 160 segundos, permanecendo aí até o fim da leitura. Como a fibra utilizada não mantém polarização, flutuações aleatórias do estado de polarização ocorrerão ao longo do tempo, em função de fatores externos com tensões mecânicas e variações térmicas.

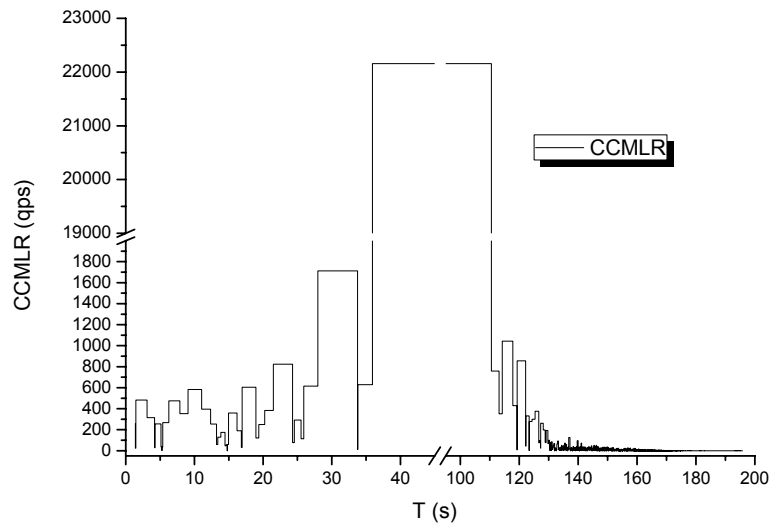


Figura 49. Comportamento temporal da interferência homódina.

Da mesma forma que no caso da interferência por ruído ASE, a ferramenta nos possibilita estimar a BER com base na CCMLR mensurada. A Figura 50 exibe o resultado desta estimativa para ambos os extremos de interferências homódinas.

Pode-se perceber que as curvas para os dois extremos são praticamente as mesmas. Isto nos leva a concluir que, embora cada extremo de interferência homódina demande uma OSIR distinta de operação, a relação CCMLR x BER mantém-se constante ao longo dos diversos pontos de operação (Figura 48) compreendidos entre eles. Apesar da clara não-estacionariedade observada na Figura 49, as medidas de CCMLR feitas em intervalos máximos de 60 segundos apresentaram comportamento bem estável, visto que foram descartadas as medidas em que se percebia uma variação aleatória da influência da polarização durante o experimento.

Comparando-se estes resultados com os obtidos no caso do ruído ASE, observa-se que as curvas CCMLR x BER estimadas guardam semelhanças, exceto pela sensibilidade da perda de quadros em função da natureza do sinal interferente. Esta similaridade não nos permitiu identificar características que nos possibilitassem diferenciá-las com base no perfil da BER. Já na comparação entre os perfis dos comportamentos temporais, ao contrário do caso do ruído ASE, cuja influência era invariável ao longo do período do experimento, a homódina sofreu enormes alterações durante o intervalo de tempo da leitura.

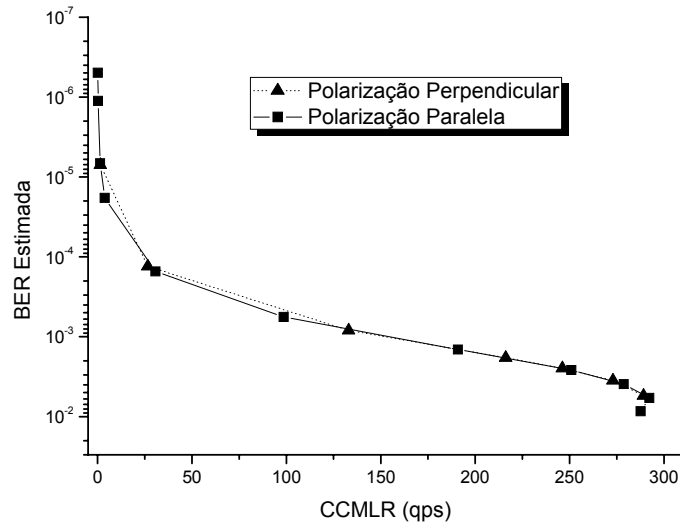


Figura 50. Estimativa de BER em função da CCMLR (Homódina)

Com base nesta característica de não-estacionariedade das interferências homódinas, é possível desenvolvermos algoritmos vinculados aos sistemas OAM que permitam inferir sobre a natureza da interferência, mantendo-se ainda a não invasividade do método.

Isto a torna um ferramenta útil no cumprimento das funcionalidades OAM necessárias (descritas na Seção 4.2) ao gerenciamento das complexidades decorrentes da integração do LT no metro ethernet.

6.6 Sumário:

Na proposta de integração a apresentada, as funcionalidades Eth-OAM desenvolvidas objetivaram a realização de testes de avaliação de desempenho e diagnóstico na arquitetura LT.

Através das ferramentas CCM-TX e CCM-RX, realizamos a caracterização do *shutter* opto-mecânico desenvolvido, identificando seu comportamento e tempos de comutação.

Pudemos também por meio delas, demonstrar sua viabilidade como ferramentas de diagnóstico (*debug*) em redes que se utilizem da funcionalidade de OAM.

Como forma de avaliar o comportamento de um sistema LT na presença de sinais interferentes, utilizamos as ferramentas mencionadas para realizar medições diversas em situações em que estavam presentes ruídos tipo ASE ou sinais homódinos. Com base nestas medições, realizamos análises diversas que comprovaram a viabilidade das ferramentas como forma de detecção indireta da BER.

Capítulo 7: Conclusões

O forte apelo da utilização da arquitetura ethernet no âmbito das redes metropolitanas vem impulsionando o desenvolvimento de novas abordagens, dentre elas a arquitetura Light-trail, que em nosso trabalho denominamos **rede metro-LT**.

O presente trabalho pôde analisar a viabilidade do uso desta arquitetura em redes metropolitanas, através da sua integração pela especificação e implementação de um escopo mínimo de funcionalidades OAM. Os subsistemas desenvolvidos, CCM-TX e CCM-RX, permitiram avaliar diversos quesitos relacionados a elementos da arquitetura LT, como, por exemplo o *shutter*, bem como o comportamento do sistema LT na presença de sinais interferentes.

A fim de realizar as avaliações e testes necessários, especificamos um arranjo que combina elementos de *hardware* e *software*. Este arranjo serviu de base para toda a nossa implementação.

Dentre os elementos de *hardware*, o dispositivo microcontrolado desenvolvido demonstrou ser bastante eficiente e flexível ao permitir controlar, via mensagens de rede, o conjunto motor de passo/filtro óptico, que desempenhava a função de *shutter* no *setup* proposto. Nos testes realizados foram obtidos tempos de comutação da ordem de **0,25s**, tempo este que, muito embora esteja aquém das capacidades dos OXCs WDM modernos, atende perfeitamente à proposta LT ora apresentada.

Sistemas ópticos costumeiramente sujeitam-se a problemas decorrentes do uso seriado de amplificadores ópticos, responsáveis pela injeção de ruído tipo ASE no sistema, ou ainda problemas originários de falhas na segmentação óptica, os quais acarretariam interferências homódinas. A funcionalidade OAM desenvolvida nos permitiu realizar avaliações qualitativas dos sinais que trafegavam pelos enlaces ópticos nestas situações.

Neste sentido, a viabilidade da ferramenta ficou demonstrada pelos resultados das análises das influências destes sinais interferentes sobre o comportamento do sistema óptico.

Com base nos resultados obtidos pelos experimentos, ficou demonstrado o perfil constante e atemporal da influência do ruído ASE, bem como o seu menor grau de influência na performance do sistema, quando comparado aos sinais interferentes homódinos. Em nosso caso, uma OSNR na casa dos **-10dB**/(30nm) já possibilitou comunicação com perdas praticamente inexistentes quando sob influência do ruído ASE.

Da análise do comportamento do sinal interferente tipo homódino, a ferramenta nos permitiu mostrar seu alto grau da variabilidade temporal, além de sua forte vinculação à polarização entre os sinais principal e interferente.

A principal contribuição do presente trabalho reside na demonstração da total viabilidade da implementação de uma arquitetura LT sobre uma plataforma gigabit ethernet, com base em equipamentos padrão de mercado, restando a implementação de um plano de controle capaz de administrar o acesso ao meio, possibilitando de forma controlada o compartilhamento dos segmentos ópticos criados sob demanda.

Como prova de princípio implementamos um *shutter* opto-mecânico microcontrolado e capaz de ser operado através de mensagens de rede.

7.1 Perspectivas:

Embora tenhamos explorado importantes aspectos na integração metro-LT via a funcionalidade OAM proposta, alguns outros pontos podem ser investigados sob a forma de trabalhos futuros.

Um deles é quanto à velocidade de operação do sistema *shutter* implementado. Neste quesito, novos trabalhos poderiam avaliar a aplicação de filtros de naturezas diversas, como os baseados em LCD, FBG ou MZI, para esta função, devendo ser, contudo, considerado o maior custo destes dispositivos.

Ainda em relação ao sistema *shutter*, visto o “deslizamento” mencionado (ver Seção 6.3) em relação ao *set-point* original, faz-se necessário realizar o controle do motor de passo em malha fechada. Isto poderia ser feito através de realimentação por leitura do nível de sinal óptico, via porta de entrada analógica do microcontrolador.

Em relação o ambiente de operação do sistema OAM, futuros trabalhos poderiam avaliar as vantagens da sua implementação sobre versões tempo real do kernel Linux, a fim de buscar um maior controle sobre os processos de escalonamento, bem como uma maior precisão nos intervalos de tempo.

Outra funcionalidade interessante a ser acrescida ao *framework* eth-OAM proposto é relativa à integração com as camadas superiores. As funcionalidades do sistema OAM poderiam ser estendidas, a fim de fornecer às demais camadas, informações qualitativas relativas aos canais ópticos. Estas informações poderiam permitir o dimensionamento automático da **MTU** e da **TCP Window** com base na “qualidade” do canal de comunicação, bem como a geração de estatísticas para uma **MIB SNMP**.

Esta integração também poderia ser realizada com subsistemas de QoS, por meio de protocolos de sinalização e reserva como o RSVP, oferecendo funcionalidade de avaliação do meio de comunicação a fim de verificar viabilidade de garantia de critérios requeridos.

Uma vez que neste trabalho nos ativemos à implementação da mensagem CCM, trabalhos futuros poderiam também complementar o *framework* com os demais tipos de mensagens especificadas em [31] e [37].

Referências Bibliográficas

- [1]. RAMASWAMI, Rajiv; “*Optical Networking Technologies: What Worked and What Didn’t*”, IEEE Communications Magazine, IEEE, 2006
- [2]. NTT; “*World Record for High-capacity Optical Fiber Transmission without Optical Dispersion Compensation*”, NTT Science and Core Technology Laboratory Group, Setembro 2008
- [3]. IWATA, Atsushi; “*Carrier-Grade Ethernet Technologies for Next Generation Wide Area Ethernet*”, IEICE TRANS. COMMUN., Vol. E89-B, Nº.3 - MARÇO 2006.
- [4]. OHTA, Hiroshi; “*Standardization Status on Carrier Classe Ethernet OAM*”, IEICE Trans. Commun. Vol. E89B, Março 2006
- [5]. AUTENRIETH, Achim; et al; “*Carrier Grade Metro Ethernet Networks*”, Beitrag der ITG-Fachgruppe 5.3.3 “Photonische Netze“, Fevereiro 2007
- [6]. MEF2; “*Requirements and Framework for Ethernet Service Protection in Metro Ethernet Networks*”, The Metro Ethernet Forum, Fevereiro 2004
- [7]. MEF4; “*Metro Ethernet Network Architecture Framework - Part 1: Generic Framework*”, The Metro Ethernet Forum, Maio 2004
- [8]. MEF6.1; “*Ethernet Services Definitions - Phase 2*”, The Metro Ethernet Forum, Abril 2008
- [9]. MEF17; “*Service OAM Requirements & Framework*”, The Metro Ethernet Fórum, Abril 2007
- [10]. GUMASTE, A.; CHLAMTAC, I.; “*Light-trails: A novel Conceptual Framework for Conducting Optical Communications*”, IEEE, 2003
- [11]. GUMASTE, A.; CHLAMTAC, I.; “*Light-trails: An Optical Solution for IP Transport*”, Journal of Optical networking, p. 261 281, vol. 3, nº 5, Maio 2004
- [12]. FANG Jing; HE, Wensheng; SOMANI, Arun K.; “*On Survivable Design In Light Trail optical Networks*”, 8th IFIP Working Conf. on Optical Network Design and Modeling, 2 a 4 Fevereiro 2004

- [13]. BALASUBRAMANIAN S.; KAMAL, A. E.; SOMANI, Arun K.; “*Medium Access Control Protocols For light-trail and light bus Networks*”, 8th IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modeling, 2 a 4 Fereveiro 2004.
- [14]. GUMASTE, A.; Si Qing ZHENG; “*Next-generation optical storage area networks: the light-trails approach*”, IEEE Communications Magazine, Volume 43, Issue 3, Março 2005, p. 72 – 79
- [15]. FREDERICK, M.T.; VANDERHORN, N.A.; SOMANI, A.K.; “*Light trails: a sub-wavelength solution for optical networking*”, High Performance Switching and Routing, 2004. HPSR. 2004 Workshop, p. 175 – 179.’
- [16]. VANDERHORN, N.A.; BALASUBRAMANIAN S.; MINA, M.; SOMANI, A.K.; “*Light-trail Testbed for IP-Centric Applications*”, IEEE Optical Communications, Agosto 2005
- [17]. GUMASTE, A.; CHLAMTAC, I.; “*Light-trails: A solution to IP centric communication in optical domain*”, Publicação Online, Springer-Verlag, Fevereiro 2003.
- [18]. GUMASTE, A.; CHLAMTAC, I.; “*Mesh Implementation of Light-trails: A solution to IP Centric Communication*”, IEEE, 2003
- [19]. KASIM, Abdul; “*Delivering Carrier Ethernet: Extending Ethernet Beyond The Lan*”, McGraw Hill, 2008
- [20]. AGRAWAL, G; “*Fiber-Optic Communication Systems*”, 3ed, Wiley, 2002
- [21]. DUTTON, Harry J. R.; “*Understanding Optical Communications*”, IBM, 1998
- [22]. BASS, Michael; “*Fiber Optics Handbook: Fiber, Devices, And Systems For Optical Communications*”, McGraw-Hill, 2002
- [23]. PERROS, Harry G.; “*Connection-oriented Networks: SONET/SDH, ATM, MPLS and Optical Networks*”, Wiley, 2005
- [24]. MAIER, Martin; “*Optical Switching Networks*”, Cambridge University Press, 2008

- [25]. BATES, Regis J.; “*Optical Switching and Networking Handbook*”, McGraw-Hill, 2001
- [26]. SCHMID-EGGER, Arno; KIRSTÄDTER, Andreas; “*Ethernet in Core Networks: A Technical and Economical Analysis*”, IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, 2006
- [27]. IEEE 802.1D; “*MAC Bridges*”, IEEE 802.1 Working Group, Junho 2004
- [28]. IEEE 802.1Q-2005; “*Virtual Bridged Local Area Networks*”, IEEE 802.1 Working Group, Maio 2006
- [29]. IEEE 802.1Qay; “*Provider Backbone Bridge Traffic Engineering – PBB-TE*”, IEEE 802.1 Working Group, em draft, acesso em 20/10/2008
- [30]. IEEE 802.1ad; “*Virtual Bridged Local Area Networks - Amendment 4: Provider Bridges*”, IEEE 802.1 Working Group, Maio 2006
- [31]. IEEE 802.1ag; “*Virtual Bridged Local Area Networks - Amendment 5: Connectivity Fault Management*”, IEEE 802.1 Working Group, Dezembro 2007
- [32]. IEEE802.1ah; “*Provider Backbone Bridge – PBB*”, IEEE IEEE 802.1 Working Group, Agosto 2008.
- [33]. IEEE 802.3-2005; “*CSMA/CD access method and physical layer specifications*”, Dezembro 2005.
- [34]. IEEE P802.3ba; “*40Gb/s and 100Gb/s Ethernet Task Force*”, Higher Speed Study Group (HSSG), <http://www.ieee802.org/3/ba/index.html>, acesso em 15/10/2008
- [35]. ITU-T G.8011; “*Ethernet over Transport – Ethernet services framework*”, International Telecommunication Union, Agosto 2004;
- [36]. ITU-T G.8031; “*Ethernet Protection Switching*”, International Telecommunication Union, Junho 2006
- [37]. ITU-T Y.1731; “*OAM functions and mechanisms for Ethernet based networks*”, International Telecommunication Union, Maio 2006
- [38]. ITU-T G.694.1; “*Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*”, International Telecommunication Union, Junho 2002

- [39]. ITU-T G.694.2; “*Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*”, International Telecommunication Union, dezembro 2003
- [40]. ANSI T1.105; “*Synchronous Optical Network (SONET) - Basic Description including Multiplex Structure, Rates, and Formats*”, American National Standards Institute, Maio 2001
- [41]. IETF Draft; “*GMPLS Ethernet Label Switching Architecture and Framework*”, Internet Engineering Task Force, 2007
- [42]. IETF Draft; “*GMPLS control of Ethernet PBB-TE*”, Internet Engineering Task Force, 2008
- [43]. IETF RFC 1157; “*Simple Network Management Protocol (SNMP)*”, Internet Engineering Task Force, 1990
- [44]. IETF RFC 2544; “*Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices*”, Internet Engineering Task Force, 1999